

**ANALYSE DER FEINSTRUKTUR DER VOGELFEDER UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG GESETZMÄSSIGER BEZIEHUNGEN
ZWISCHEN DEN FEDERELEMENTEN**

von

Bertold Schweizer

aus

Bayreuth

1975

ANALYSE DER FEINSTRUKTUR DER VOGELFEDER UNTER BERÜCKSICHTIGUNG GESETZMÄSSIGER BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN FEDERELEMENTEN

Den Naturwissenschaftlichen Fachbereichen
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades



vorgelegt

von

Bertold Schweizer

aus

Bayreuth

Als Dissertation genehmigt von den Naturwissenschaftlichen
Fachbereichen der Universität Erlangen-Nürnberg.



Tag der mündlichen Prüfung:	4. Februar 1975
Vorsitzender der kommissarischen Promotionskommission:	Universitätsprofessor Dr. Behrens
Erstberichterstatter:	Universitätsprofessor Dr. W. Neuhaus
Zweitberichterstatter:	Universitätsprofessor Dr. D. Matthes

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Einleitung	1
Material und Methode	3
I. Gesetzmäßige Beziehungen zwischen Schaft-Ast-Rate und Schaft-Ast-Winkel	4
A. Ableitung und Diskussion des Gesetzes	4
B. Anwendung auf die Schwungfedern	8
C. Erweiterung des Gesetzes	10
D. Untersuchung der einzelnen Größen des Gesetzes bei verschiedenen Vogelarten	15
1. Die Schaft-Astwinkel	15
2. Die Astdichte	22
3. Die Flächendichte	32
II. Die Festigkeit der Federfahne	35
A. Ableitung einer Näherungsformel und theoretische Betrachtungen	35
B. Anwendung der Formel auf Schwungfedern	42
C. Der flächenverändernde Quotient	46
D. Vergleich der Festigkeiten verschiedener Vogelfedern	49
E. Zusammenhänge zwischen Fahnenfestigkeit, Körpergewicht und spezifischer Flächen- belastung	57
III. Gesetzmäßige Zusammenhänge in Bau und Anordnung der Federstrahlen	62
A. Gültigkeit des allgemeinen Federgesetzes	62
B. Untersuchung der Strahlen verschiedener Schwungfedern	64
C. Erweiterung des Federgesetzes und Zusammen- hänge zwischen Festigkeit und Strahlenanordnung	68
Zusammenfassung	70
Literaturverzeichnis und Anhang	III

EINLEITUNG

Die Vogelfeder hat von jeher das Interesse der Biologen geweckt und zu einer Fülle von Forschungen angeregt. Früheste Federuntersuchungen gehen bis auf MALPIGHI und LEEUWENHOEK zurück, jedoch erscheinen erst im 19. Jahrhundert Arbeiten, welche wertvolle und den Tatsachen entsprechende Angaben enthalten. Bedeutung für spätere Untersuchungen erlangt hierbei das "System der Pterylographie" von NITZSCH. Das Forschungsgebiet wird allmählich immer weitreichender; zur bloßen morphologischen Beschreibung der Strukturen kommen Untersuchungen über Federwachstum, Entwicklung, Pigmentierung usw. hinzu. Die Reihe der Forscher ist dementsprechend lang und läßt sich bis in die heutige Zeit verfolgen. Verwiesen sei auf AHLBORN, MASCHA, SPÖTTEL, SICK, RUTSCHKE, um nur einige zu nennen.

Beim Studium der Literatur fällt auf, daß trotz der vielschichtigen Forschung manche Eigentümlichkeiten der Feder bisher unbekannt geblieben sind. Insbesondere läßt eine mathematisch-funktionelle Untersuchung der Strukturen noch Möglichkeiten offen, so daß eine Analyse der Feinstruktur der Vogelfeder unter diesem Gesichtspunkt nützlich erscheint.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit besteht darin, mathematisch-geometrische Gesetzmäßigkeiten in der Struktur einer normalen Konturfeder aufzudecken, ihren Einfluß auf funktionelle Eigentümlichkeiten der Feder deutlich zu machen und bereits vorhandene Erkenntnisse über den Federbau zu erweitern.

Die vorliegende Abhandlung basiert auf einer Staatsexamensarbeit mit dem Thema "Die Struktur der Eulenfeder", die mir von meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Walter NEUHAUS in Erlangen anvertraut wurde. Ein während der Untersuchung von Eulenfedern aufgedecktes, für alle normalen Konturfedern geltendes Federgesetz, das den Bau und die Anordnung der Federelemente in einen sinnvollen Zusammenhang stellt, wurde zum Ansatzpunkt dieser Arbeit, wobei der Rat meines Lehrers ausschlaggebend war,

diese Gesetzmäßigkeiten in geeigneter Weise zur funktionellen Deutung der Federstruktur heranzuziehen.

Herr Professor NEUHAUS unterstützte mich auch nach seiner Berufung zum Ordinarius nach Hamburg jederzeit mit Rat und Tat, so daß es mir zur angenehmsten Pflicht wird, ihm an dieser Stelle meinen herzlichen Dank auszusprechen.

Die theoretische Grundlagenforschung für die Promotion war Ende 1967 abgeschlossen. Während meiner Referendarausbildung und im Zuge der Eingewöhnungszeit als Lehrer konnte ich mich nicht mehr dazu aufraffen, die Promotion durch praktische Federuntersuchungen voranzutreiben und abzuschließen.

Dies geschah erst Ende 1973, als Herr Professor Dr. W. Neuhaus emeritiert war.

MATERIAL UND METHODE

Zur Untersuchung kamen Federn der verschiedensten Vogelarten, zunächst ohne Berücksichtigung verwandtschaftlicher Beziehungen. Das Federmaterial stammte teilweise aus der Vogelsammlung des Zoologischen Instituts der Universität Erlangen, teilweise aus privaten Sammlungen.

Die Herbeischaffung von Ganzpräparaten bzw. von Flügeln war erheblich schwieriger als das Erhalten von Einzelfedern. Bei den Greifvögeln mußte meistens auf älteres Material zurückgegriffen werden.

Es wurden nur Konturfedern untersucht, das Hauptaugenmerk war auf die Schwungfeder gerichtet und hier wiederum auf Federäste und Strahlen.

Die Beobachtungen erfolgten mit einem Zeiss-Mikroskop (Junior), zur genauen Messung von Längen und Winkeln standen ein Meßokular und ein Goniometer zur Verfügung. Die Meßwerte wurden tabellarisch geordnet und teilweise graphisch ausgewertet. Die Feder-elemente wurden bei 20-facher, 80-facher und 320-facher Vergrößerung untersucht.

Mit zunehmender Vergrößerung war eine Zerstückelung des Materials nicht zu umgehen. Insbesondere zum Messen der Astbreite und der Asthöhe mußten die Äste durchtrennt werden.

Was die Benennung der Federteile angeht, so folgt die vorliegende Arbeit der von SICK (1937) angewandten Nomenklatur, vermeidet aber die Einführung des englischen Namens.

Auf das allgemeine Bauschema der Konturfeder wird jeweils an geeigneter Stelle in dieser Arbeit eingegangen, so daß eine vorausgehende Erläuterung nicht notwendig erscheint.

I. GESETZMÄßIGE BEZIEHUNGEN ZWISCHEN SCHAFT- AST - RATE UND SCHAFT - AST - WINKELSTELLUNG.

A. Ableitung und Diskussion des Gesetzes

Vergleicht man die Astdichte -bezogen auf eine bestimmte Schaftlängeneinheit- einer beliebigen Konturfeder mit der Winkelstellung der Äste zum Schaft, so macht sich ein auffälliger Zusammenhang bemerkbar:

Je kleiner die Astdichte, desto geringer der zugehörige Winkel. Es liegt eine gesetzmäßige Beziehung vor, die im folgenden theoretisch hergeleitet und durch Messungen praktisch bestätigt werden soll.

Zunächst definieren wir die Astdichte D als die auf die Schaftlängeneinheit 1 mm bezogene Anzahl der Rami. Die Bestimmung der Astdichte könnte näherungsweise durch Auszählen unter dem Mikroskop erfolgen. Diese Methode ist aber ungenau und gibt außerdem mögliche Dichteschwankungen auf engem Fahnenbereich nicht wieder. Ein Beispiel soll dies deutlich machen:

Beim Auszählen der Rami auf 3 cm Schaftlänge einer Taubenfeder erhalten wir genau die Anzahl 26.

Nach obiger Definition würde das bedeuten:

$$\frac{26 \text{ Rami}}{3 \text{ cm Länge}} = \frac{8,6 \text{ Rami}}{1 \text{ cm Länge}} = \frac{0,86 \text{ Rami}}{1 \text{ mm Länge}}$$

0,86 Rami auf 1 mm Ramuslänge durch Auszählen zu bestimmen ist unmöglich. Außerdem ist eine Veränderung der D-Werte auf 3 cm Schaftlänge höchst wahrscheinlich und durch diese Art von Dichtebestimmung nicht feststellbar.

Wir setzen einmal voraus, daß im genannten Beispiel zwischen zwei Ästen eine gleichbleibende Schaftstrecke a vorliegt, in die eine Astdicke mit einbezogen ist.

$$\text{Wir definieren:} \quad D = \frac{Z \text{ (Anzahl der Äste)}}{1 \text{ mm}} \quad (1)$$

$$1 \text{ mm} = Z \cdot a \text{ mm}$$

$$Z = \frac{1 \text{ mm}}{a \text{ mm}} = \frac{1}{a}$$

$$\text{also} \quad D = \frac{1}{a} \text{ mm}^{-1} \quad (2)$$

Die Messung von a mit dem Meßokular bedeutet überhaupt keine Schwierigkeiten. Sie ist viel genauer und ermöglicht die Bestimmung von Dichteschwankungen. Alle durch Auszählen erhaltene Astdichten stellen daher nur Näherungswerte der tatsächlichen Astdichten $D = \frac{1}{a}$ dar.

In unserem Beispiel ergibt sich:

$$D = 0,86 \text{ (Z/mm)}$$

$$1 \text{ mm} = 0,86 \cdot a$$

$$a = 1 : 0,86 = 1 : \frac{13}{15} = \frac{15}{13} \text{ (mm)}$$

Bei 80-facher Vergrößerung entsprechen 100 Teilstriche des Meßokulars $5/4$ mm.

Für $a = \frac{15}{13}$ mm mißt man also $\frac{15}{13} : \frac{1}{80}$ Teilstriche = ca. 92.

Zur Ableitung der gesetzmäßigen Beziehung zwischen Dichte und Winkelstellung betrachten wir Abb. 1.

Im Dreieck ABC gilt:

$$\sin \alpha = \frac{u}{a} \quad (3)$$

nach (2) folgt:

$$\sin \alpha = u \cdot D \quad (4)$$

$$D = \frac{\sin \alpha}{u} \quad (5)$$

Diese Beziehung - das Produkt aus Astdichte und Astabstand ist gleich dem $\sin$ - Wert des zugehörigen Winkels - gilt für alle Vögel mit normalen Konturfedern.

Dies haben auch die Messungen an einer Vielzahl von Federn beliebiger Vogelarten ergeben. Die graphische Darstellung der Messwerte zweier willkürlich gewählter Federn (Abb. 2 u. 3) möge dies zeigen. Dabei sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- a) Die Ordinaten geben die Schaftlänge wieder. Die Einteilung der Markierungspunkte von proximal nach distal erfolgte im Abstand 10 mm.
- b) Die Abszissen geben - bei gleicher Maßeinheit - die Meßwerte der Größen a , u und $\sin \alpha$ wieder. Strecken wurden mit dem Meßokular, Winkel mit dem Goniometer bei 80-facher Vergrößerung bestimmt.

- c) Zur Überprüfung von a , u und α wurden probeweise die Entfernungen und Einzelwinkel von n nebeneinanderliegenden Ästen ermittelt und das Ergebnis durch n geteilt:

$$a = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

$$u = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n}$$

Dabei zeigte sich kein nennenswerter Unterschied zu den gemessenen Einzelgrößen.

- d) Die in den Markierungspunkten gemessenen Werte einer Größe sind geradlinig verbunden. Für die Meßpunkte der $\sin\alpha$ -Kurve zeigt sich dabei folgendes: jeder $\sin\alpha$ -Wert ist auch durch Produktbildung der beiden entsprechenden Meßwerte für D und u zu erhalten. Die Produktkurve ($D \cdot u$) ist daher nahezu mit der $\sin\alpha$ -Kurve identisch. Damit wird aber die theoretische Ableitung der Beziehung $D = \sin\alpha/u$ durch die praktische Messung bestätigt.
- e) Geringe Abweichungen von Produktkurve und $\sin\alpha$ -Kurve sind durch Meßungenauigkeiten erklärbar, denen folgende Faktoren zugrunde liegen.

- Der Federschaft ist gebogen.
- Die Federfahne bildet eine gewölbte Fläche.
- Die Ausbildung der Äste kann schwanken.
- Fehlerhaftes Ablesen an Meßokular und Goniometer.

f) Fehlerabschätzung:

Wir betrachten die Meßwerte von Position 11 in Tab. 2b

$$a_m = 32 \text{ Teilstriche}$$

$$u = 21 \text{ Teilstriche}$$

$$\alpha = 43^\circ$$

Im Meßokular (100 Teilstriche) ist für die vorliegenden Objekte nach Einübung 1/2 Teilstrich bei 80-facher Vergrößerung abzulesen mit einer Genauigkeit von 1/5 Teilstrich. Das ergibt für:

$a_m = 32$ T eine Genauigkeit von $1/160 \approx 0,6 \%$

$u = 21$ T eine Genauigkeit von $1/105 \approx 0,9 \%$

Man kann demnach für alle in der Arbeit gemessenen Längenwerte, welche die gleiche Größenordnung haben wie die beiden speziellen Fälle, mit einem Fehler von etwa 1 % rechnen. Das benutzte Goniometer ermöglicht mit Nonius die Winkelablesung auf $1/10^\circ = 6$ genau.

Aus der Natur der Schaft-Astwinkel wird diese Genauigkeit nicht erreicht. Man kann mit 1° rechnen. Das bedeutet für $\alpha = 43^\circ$ eine Genauigkeit von 2,5 % und für $\sin\alpha$, die für die Untersuchung maßgebliche Größe, eine Genauigkeit von 1,5 %. Beim Vergleich des aus α sowie aus a_m und u ermittelten Wertes von $\sin\alpha$ erhält man in unserem speziellen Fall $\sin\alpha = 0,66$ bzw. 0,68.

Die Differenz ist gering und beträgt 3,3 %.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß für das Ergebnis der verschiedenen Messungen und Berechnungen eine Genauigkeit von etwa 3 % erreicht wird, was für alle Schlußfolgerungen bei weitem hinreichend ist.

- g) Die abgebildeten Kurven sind durch die (geradlinige Verbindung der Einzelwerte entstanden und stellen demgemäß keine mathematisch einfach formulierbaren Funktionen dar, was wegen geringer Unstetigkeiten bei manchen benachbarten Dichtewerten auch nicht zu erwarten ist. Auf kurzen Schaftstrecken schwanken diese oft erheblich, wie das Beispiel der Schleiereulenfeder beweist (Abb. 4). Daher sind die Änderungstendenzen der Gesamtkurve zu erfassen, um Regelmäßigkeiten aufzudecken.

B. Anwendung auf die Schwingfedern.

Astdichten von Konturfedern wurden bereits von vielen Autoren bestimmt (MASCHA, JUHN, FRAPS, SICK, DURRER usw.), doch erfolgten die Messungen unabhängig von der gesetzmäßigen Beziehung $D = \sin\alpha/u$ und allein durch Auszählen. Die besondere Bedeutung der Schwingfedern eines Vogels legt eine Untersuchung der genannten Größen D , u und α an den Hand- und Armschwingen nahe. Von den von mir untersuchten Flügeln (Tauben, Schleiereule, Waldkauz, Haushuhn, Steinadler, Wildente, Mauersegler, Sperling usw.) soll stellvertretend der rechte Flügel eines Turmfalken überprüft werden.

Die graphischen Darstellungen der Meßwerte sind in den Abb. 5 - 16 wiedergegeben. Daraus läßt sich zunächst für jede einzelne Schwingfeder folgendes ableiten.

- Von proximal nach distal nehmen die Astdichten der Außenfahne und der Innenfahne ab.
- Mit dem Abnehmen der Astdichten von Außenfahne (D_a) und Innenfahne (D_i) nach der Federspitze zu ist gleichzeitig eine Verengerung der Schaft-Ast-Winkel festzustellen.

Das Auftreten maximaler Astdichten im proximalen Schaftbereich ist nach der Formel $D = \sin\alpha/u$ leicht verständlich, denn der Bruch $\frac{\sin\alpha}{u}$ hat seinen größten Wert ($D_{\max}$) für $\alpha = 90^\circ$.

$$D_{\max} = \frac{\sin 90^\circ}{u_{\min}} = \frac{1}{u_{\min}}$$

Auch das Auftreten geringster Astdichten an der Federspitze ist durch den kleineren Zähler ($\sin\alpha$) zu erwarten.

- Anders verhält es sich mit dem Astabstand u . Bei dieser Größe ist es auffällig, daß sie Minimum-Werte nur an Schaftanfang und Schaftende hat, während an den übrigen Schaftmarkierungspunkten fast immer gleichbleibende u -Werte vorliegen.
- Interessant ist ein Vergleich einander entsprechender Größen der Innen- und Außenfahne an einem beliebigen Markierungspunkt. Es zeigt sich, daß bei den Handschwingen in jedem Kontrollpunkt D_i größer ist als D_a . Diese Beobachtung wurde bereits von MASCHA gemacht. Überraschend ist auch, daß u_i immer etwas kleiner als u_a ist. Dieses Ergebnis steht aber im Widerspruch zur Auffassung von SICK, der den Außenfahnen-Rami einer Schwingfeder ein enges Zusammenstehen nachsagt.

Nach der Formel $D = \sin \alpha / u$ ist aber ein engeres Zusammenstehen der Außenfahnenrami gegenüber den Innenfahnenrami - bedingt durch kleinere Schaftastwinkel - nicht notwendig.

Da $u = \sin \alpha / D$, braucht der Wert des Bruches bei gleichzeitiger Abnahme von Zähler und Nenner nicht geändert werden.

- Im allgemeinen sind auch die Winkel der Außenfahnenäste zum Schaft kleiner als die der entsprechenden Innenfahnenäste. Abweichungen können auftreten, wie die 3., 5., 7., 9. Handschwinge und die Armschwinge zeigen.

Vergleichen wir die Mittelwerte über die gesamte Außen- u. Innenfahne aller untersuchten Federn (von der ersten Handschwinge bis zur letzten Armschwinge fortlaufend), dann zeichnen sich folgende Tendenzen ab:

- Der Dichteunterschied ($D_i - D_a$) nimmt mit zunehmender Entfernung der Feder von der Flügelvorderkante ab. Dies hat seinen Grund in der wachsenden Dichte der Außenfahnenrami gegenüber gleichbleibenden Dichten der Innenfahnenrami. Dies kann bei den Armschwinge manchmal dazu führen, daß D_a größer D_i wird. Insgesamt aber bleiben die Astdichten der Außenfahne immer noch etwas unter denen der Innenfahne.
- Die Winkelgröße der Af-Rami zum Schaft nimmt zu und übertrifft die der If-Rami bei den Armschwinge.
- Während bei den Handschwinge die Astabstände der Af-Rami nur geringfügig größer sind als die der If-Rami, wird der Unterschied ($u_a - u_i$) bei den Armschwinge bedeutend größer.
- Wie aus der Abb. 17, die die aus den Einzelgrößen aller untersuchten Federn ermittelten Durchschnittswerte in Abhängigkeit der Lage der Federn im Flügel wiedergibt, hervorgeht, nimmt die Außenfahne der ersten Handfeder eine Sonderstellung ein. Sie besitzt die geringste Astdichte und die kleinsten Schaftastwinkel.

C. Erweiterung des Gesetzes

Ableitung der Flächendichte D' :

Zu den bisherigen Größen D , α und u wird als neue Größe die Flächendichte D' der Äste eingeführt.

Wir definieren D' als die Anzahl Z der Äste pro Fahnenflächeneinheit 1 mm^2 . Da die Zahl der Äste pro 1 mm^2 aber identisch ist mit der Zahl der Äste auf der Strecke 1 mm senkrecht zu den Ästen, gilt:

$$D' = Z / 1 \text{ mm} \quad (6)$$

Zwischen zwei benachbarten Ästen liegt analog zur Ramidichte D der Abstand u vor, so daß die Zahl der Äste pro Fahnenflächeneinheit 1 mm^2 gleich ist der Zahl der Astabstände u pro 1 mm .

$$Z \cdot u = 1 \text{ mm}$$

In (6) eingesetzt:

$$D' = Z / (Z \cdot u) \quad \text{mm}^{-1}$$
$$D' = 1/u \quad \text{mm}^{-1} \quad (7)$$

Man erkennt, daß der reziproke Wert von u der Flächendichte D' der Äste entspricht. Damit kann eine neue gesetzmäßige Beziehung zwischen Astdichte, Flächendichte und Winkelstellung abgeleitet werden:

$$\text{Aus } D' = 1/u$$

$$\text{und } D = \sin \alpha / u$$

folgt:

$$D = D' \sin \alpha \quad (8)$$

Das Produkt aus Flächendichte der Äste und $\sin$ -Wert der Schaft-Ast-Winkel bestimmt die Astdichte einer Feder.

Theoretische Betrachtungen:

Aus der Formel $D = D' \sin \alpha$ ist ersichtlich, daß in jedem Meßbereich der Feder $D' > D$ ist. Wird im proximalen Fahnenbereich $\alpha = 90^\circ$, so ist maßzahlmäßig $D' = D$.

Maximale Flächendichten sind nach $D' = D / \sin \alpha$ dann zu erwarten, wenn kleine Winkel auftreten und/oder große Astdichten.

Maximale D' -Werte finden sich daher in Schaftnähe nur an der Federbasis - auf Grund großer Astdichten - und an der Federspitze auf Grund sehr kleiner Winkel.

Die Untersuchungsergebnisse an den verschiedensten Federn decken sich mit den hier theoretisch aufgezeigten Möglichkeiten.

Zwischen D und D' besteht ein sehr wesentlicher Unterschied:

Während die Astdichte vom Winkel abhängt, unter dem die Bezugsachse (hier Federschaft) die Äste schneidet, ist die Flächendichte winkelunabhängig! So treten bei gleicher Flächendichte verschiedenste Astdichten entlang beliebig gewählter Bezugsrichtungen auf, wobei nach $D = D' \sin \alpha$ die D -Werte mit den α -Werten zu- oder abnehmen.

Vergleich verschiedener Schwungfedern

Zunächst soll die Flächendichte D' bei den bisher besprochenen Federn des Turmfalken ergänzend berücksichtigt werden. Wie oben gezeigt wurde, liegt der Flächendichte die Messung des Astabstandes u zugrunde. (Infolge der besonderen Insertion der Äste am Schaft - über die später noch näher berichtet wird - erfolgte die Messung der u -Werte nicht direkt am Schaft, sondern im Abstand von ca. 1/10 mm. Gleiches gilt auch für die Messung der a_m -Werte).

Es muß also bedacht werden, daß jeder in den Abb. 2 - 17 angegebene u -Wert dem reziproken Wert einer in Schaftnähe auftretenden Flächendichte D' gleichzusetzen ist. Somit ergibt sich für die Schwungfedern des Falken folgendes:

- Jede Schwungfederaußenfahne hat in Schaftnähe kleinere D' -Werte als die Innenfahne.
- Die Flächendichten haben ihre Maximalwerte proximal und distal am Schaft.
- Bei den Handschwingen nehmen die Flächendichten von Innen - und Außenfahne mit zunehmender Entfernung der Feder von der Flügelvorderkante ab.
- Bei Armschwingen zeigen die Innenfahnen ein langsames Ansteigen der D' -Werte.

Dadurch wird der Unterschied zwischen den D' -Werten von Innen- und Außenfahnen ($D_1' - D_a'$) bei einer Armschwinge größer als bei einer Handschwinge.

Wie sich Flächendichte, Winkel und Astdichte bei den Stoßfedern eines Vogels verhalten, wird am Beispiel des Sperbers gezeigt, wobei dessen Flügelschwungfedern zum Vergleich herangezogen werden.

1. Handschwinge

Af: Es liegen sehr kleine Astdichten mit einem Durchschnittswert $D_m = 0,6$ vor, ferner sehr spitze Winkel mit einem Mittelwert von 10° . Die mittlere Flächendichte D_m' beträgt 3,7.

If: Der D_m -Wert ist mit 2,3 bedeutend höher als bei der Außenfahne, das gleiche gilt für den Durchschnittswinkel α_m der 31° mißt. Die Flächendichte D_m' ist mit 4,0 etwas größer als die der Außenfahne.

Für die Berechnung der Durchschnittswerte von D' , D und α werden die im proximalen und distalen Fahnenbereich auftretenden Werte nicht berücksichtigt, da die genannten Fahnenabschnitte mit möglichen Extremwerten -deren Ursache oben besprochen wurde- nur ca. 5 % der Gesamtfahnenlänge ausmachen.

Innerhalb der Schwungfedern des Flügels machen sich -bei der 1. Handschwinge beginnend und mit der letzten Armschwinge endend- folgende Tendenzen bemerkbar, die denen im Turmfalkenflügel ähneln:

- Bei den Außenfahnen steigen die Astdichten und pendeln sich auf einen Durchschnittswert von 1,8 ein.
- Die Flächendichte nimmt ab, bis sie einen D_m' -Wert von 2,8 erreicht hat.
- Die Winkel steigen weiter an bis auf Durchschnittswerte von 39° .
- Bei den Innenfahnen wird die Höchstdichte von 2,3 der 1. HS allmählich auf einen Mittelwert von 1,9 bei den Armschwingen reduziert. Damit ist die Astdichte nur noch geringfügig größer als die der Außenfahne.
- Der Durchschnittswert der Flächendichte nimmt ebenfalls ab, bis er 3,3 erreicht hat und steigt bei den Armschwingen wieder etwas an.
- Die Winkel bleiben in den einander entsprechenden Schaftbereichen verhältnismäßig konstant.

An Extremwerten treten auf:

Maximalwerte:	$D = 4,0$	(1. HS, If)
	$D' = 6,6$	(7. AS, If)
	$\alpha = 70^\circ$	(1. HS, If)
Minimalwerte:	$D = 0,4$	(1. HS, Af)
	$D' = 2,5$	(7. AS, Af)
	$\alpha = 5^\circ$	(1. HS, Af)

Betrachten wir nun die Stoßfedern:

1. Stoßfeder: (von außen gerechnet, rechts)

$$\text{Af: } D_m' = 3,3$$

$$D_m = 1,5$$

$$\alpha_m = 25^\circ$$

$$\text{If: } D_m' = 3,4$$

$$D_m = 2,0$$

$$\alpha_m = 33^\circ$$

2. Stoßfeder:

$$\text{Af: } D_m' = 2,9$$

$$D_m = 1,6$$

$$\alpha_m = 33^\circ$$

$$\text{If: } D_m' = 3,1$$

$$D_m = 1,8$$

$$\alpha_m = 31^\circ$$

6. Stoßfeder: (Mittellage)

$$\text{Af: } D_m' = 2,6$$

$$D_m = 1,6$$

$$\alpha_m = 35^\circ$$

$$\text{If: } D_m' = 3,1$$

$$D_m = 1,7$$

$$\alpha_m = 34^\circ$$

Man sieht, daß ähnliche Verhältnisse vorliegen wie bei den Schwungfedern des Flügels; denn entsprechend ihrer Körperlage machen sich von den äußeren bis zu den inneren Stoßfedern folgende Faktoren bemerkbar:

- Bei den Außenfahnen steigen die Astdichten und Winkel an, die Flächendichten nehmen ab.
 - Bei den Innenfahnen werden Astdichten und Flächendichten kleiner.
- Es gleichen sich also -wie bei den Flügelfedern- die Astdichten und Winkel von Innen- und Außenfahne an. Da die Innenfahnen der körpernäheren Federn einerseits etwas höhere Astdichten und andererseits etwas kleinere Winkel als die Außenfahnen besitzen, wird der Quotient $D' = D/\sin\alpha$ bei der Innenfahne größer als bei der Außenfahne und es resultiert eine deutliche Differenz ($D'_i - D'_a$).

Es zeigt sich außerdem, daß die Stoßfedern bezüglich extremer Werte keine ähnliche Sonderstellung einnehmen wie die äußeren Handschwingen. Diese besitzen in den Außenfahnen die kleinsten Astdichten und Winkel aller Konturfedern, in den Innenfahnen die höchsten Astdichten. Die übrigen Deckfedern liegen mit ihren Astdichten und Winkeln innerhalb der Grenzwerte, die von den Handschwingen des Flügels gesetzt werden.

Was die Flächendichte angeht, kommt auch der Feder des Daumenfittichs, die der Flügelkante am nächsten liegt, so wie den vorderen Flügeldeckfedern, eine besondere Bedeutung zu: sie haben maximale Flächendichten, die noch etwas größer sind als die der äußeren Handschwingen.

Beim Auerhahn z.B. treten an Af und If seiner vordersten großen Flügeldeckfeder D' -Werte von 7 auf gegenüber D' -Werten von 6 in seiner 1. HS. Die erste Feder des Daumenfittichs hat beim Sperber in der Innenfahne D' -Werte von 4 - 5, die 1. HS dagegen Werte um 4. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß diese Federn bedeutend kleinere Fahnen als die Schwungfedern haben.

Über die Untersuchung weiterer Vogelarten geben die graphischen Darstellungen (Abb. 18-35) Aufschluß. Eine Fülle von Stichproben an verschiedensten Federn ergänzt die Meßdaten, ohne daß darüber besondere Tabellen geführt sind. Zur Methodik sei gesagt, daß von den Schwungfedern jeweils solche mit identischer Lage im Federkleid zum Vergleich herangezogen werden. Dies erscheint zweckmäßig, da bei allen untersuchten Vogelarten die Schwungfedern an Flügel und Stoß von außen nach innen ähnlichen Veränderungen bezüglich Flächendichte, Astdichte und Winkelstellung unterliegen wie die von Sperber oder Turmfalke.

Zur Gliederung und Diskussion des Beobachtungsmaterials ist es meines Erachtens sinnvoll, die zahlreichen Meßwerte nach der ihnen zugrunde liegenden Größe zu ordnen. Es werden also die Meßdaten für die Flächendichte, für die Astdichte und für die Winkelstellung gesondert betrachtet. Damit ergeben sich Beziehungen zwischen einer solchen Größe und ihren Werten bei verschiedenen Vogelarten und Federn.

Mit der Winkelstellung soll begonnen werden.

D. Untersuchung der einzelnen Größen des Gesetzes bei verschiedenen Vogelarten

1. Die Schaft-Ast-Winkel

Die gesetzmäßige Beziehung zur Berechnung der Schaft-Ast-Winkel lautet: $\sin \alpha = D/D'$

Der Quotientenwert D/D' bewegt sich zwischen den Grenzen 0 und 1, so daß niemals $D > D'$ werden kann.

Es gilt außerdem: je kleiner die Differenz der Maßzahlen von D' und D ist, desto größer wird der Quotientenwert und somit der Schaftastwinkel. Bei gleicher Maßzahldifferenz zweier verschiedener Federfahnenbereiche hat jener Bezirk größere Winkel aufzuweisen, der die höhere Flächendichte besitzt. Dies sei am Beispiel von Steinadler und Uhu gezeigt:

Die 1. HS hat in Position 12 der Innenfahne beim Uhu (Abb. 18,19) folgende Werte: $D = 2,7$, $D' = 4,0$ also $D' - D = 1,3$

$$\sin \alpha = D/D' = 0,675$$

Beim Steinadler finden sich bei Position 12 der Innenfahne der 1. HS die Werte: $D = 1,6$, $D' = 2,9$ also $D' - D = 1,3$

$$\text{aber } \sin \alpha = D/D' = 0,552$$

Durch eine einfache Rechnung kann man zeigen, daß $D_1/D_1' > D_2/D_2'$, wenn $D_1' > D_2'$ und $D_1' - D_1 = D_2' - D_2$.

Aus den vielen Meßdaten lassen sich zunächst für alle Deckfedern geltende Gesetzmäßigkeiten ableiten. Die größten Winkel treten immer im proximalen Schaftbereich einer Feder auf. Hier können die Winkel Maximalwerte von 90° erreichen und bedingen dann Gleichheit in den Maßzahlen von Flächendichte und Astdichte.

Nach der Federspitze zu nehmen im allgemeinen die Winkel ab. Dies gilt für Innenfahne und Außenfahne gleichermaßen.

Darüberhinaus unterscheiden sich bei allen Konturfedern- mit Ausnahme der Schwungfedern an Flügel und Stoß- auf gleicher Schafthöhe die Schaftastwinkel von Innen- und Außenfahne kaum oder nur geringfügig.

Die Winkelunterschiede bei den Schwungfedern zeigen sich in kleinen Außenfahnenwinkeln und großen Innenfahnenwinkeln. Dabei wird folgende Tendenz deutlich: je näher eine Schwungfeder an der Flügelvorderkante, bzw. an der Außenseite des Stoßes inseriert, desto kleiner werden die Winkel der Af und desto größer die der If. Die Winkelunterschiede machen sich innerhalb der Flügelgedern bei den Armschwingen weniger deutlich bemerkbar als bei den Handschwingen.

Eine funktionelle Deutung der Winkelstellung ist bereits mehrfach von verschiedenen Autoren gegeben worden; sie gipfelt in der Feststellung, daß die unterschiedliche Winkelstellung der Schwungfederäste auf die Festigkeit der Feder Einfluß habe (SICK, 1938).

Zum Verständnis des Sachverhaltes ist es notwendig, zwei Dinge zu berücksichtigen: den besonderen Bau der Rami und die Kraftwirkungen, die an der bewegten Feder auftreten.

Die morphologischen Baumerkmale der Äste sind bekannt und ihre Abänderungen bei den verschiedenen Vogelarten oft beschrieben worden (AHLBORN, MASCHA, SPÖTTEL u.a.). Die Grundstruktur könnte mit einem Balken von rechteckigem Querschnitt verglichen werden, dessen Höhe die Breite deutlich übertrifft. Die Äste wurzeln im dorsalen Abschnitt der beiden Seitenwände des Schaftes und ziehen schräg zur Federspitze nach oben, wobei die untereinander parallelen Seitenwände der Äste senkrecht auf der Fahnenebene stehen. Im ventralen Bereich der Astbasis findet sich eine Einschnürung, die ein scharnierartiges Hin- und Herklappen der Äste begünstigt. Im dynamischen Zustand einer Schwungfeder bewirken die Druckverhältnisse an der Innenfahne eine nach der Federbasis zu gerichtete Bewegung der Äste, in der Außenfahne werden die Äste nach vorne zusammengedrückt. Den Druckbeanspruchungen entsprechend, ziehen bei vielen Schwungfedern von der Astbasis Hornrippen schräg gegen den ventralen Bereich der Schaftseitenwände. Diese Hornwülste sind so beschaffen, daß sie die Bewegung der Innenfahnenäste zur Federbasis, die der Außenfahnenäste nach vorne und nach distal unterstützen. Die Rippen an den Innenfahnenästen sind zur Federspitze hin verstärkt, die der Außenfahnenäste zur Federbasis hin.

Wenn oben idealisiert von rechteckigen Astquerschnitten gesprochen wurde, so ist die Natur in der Ausbildung der Rami viel variabler. So reicht die Skala von annähernd rechteckigen Querschnitten bis hin zu C-förmigen Profilen. Die Bedeutung dieser Querschnittsformen wird später erörtert.

Physikalisch-aerodynamische Untersuchungen von LORENZ, ZIMMER, STOLPE, v. HOLST u.a. haben ein gutes Bild von den Kraftwirkungen ergeben, die am fliegenden Vogel auftreten. Von den Strömungskräften interessieren in diesem Zusammenhang zunächst nur die Kräfte, die den Anblaswind verursachen, ferner die Reibungskräfte,

die zusammen mit Fahrt- und Schlagwind die Winkelstellung der Federäste beeinflussen.

Die Reibungskräfte treten in den Fahnteilen einer Feder auf, die, von einer Nachbarfeder bedeckt, bei Flugbeanspruchung auseinanderweichen. Das sind in erster Linie die Schwungfedern des Flügels und die Stoßfedern. Je nachdem wie die aufliegende Feder die unterliegende Fahne bedeckt, läßt sich eine Schaftreibung von einer Fahnenreibung unterscheiden. Die Richtung der Reibungskräfte in Fahnenebene verläuft dann etwa rechtwinklig zur Federachse.

Welche Konsequenzen ergeben sich nun aus dem Bau der Rami und den dargelegten Kraftwirkungen für die Winkelstellung der Äste?

Aus der Literatur ist ersichtlich, daß die kleinen Winkel der Außenfahnenäste zum Schaft bei der Schwungfeder mit einer "Engerlagerung der Außenfahnenrami distal ihrer Basis" (SICK) in Verbindung gebracht wird, "die zur besonderen Verfestigung der Außenfahne wesentlich beiträgt."

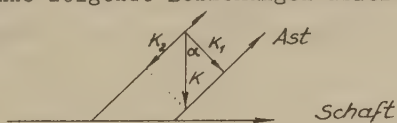
Was die Folgerung über die Festigkeit betrifft, ist dem zuzustimmen; keinesfalls muß aber die geringe Winkelstellung der Af-Äste einer Schwungfeder eine Engerlagerung der Äste vorbereiten, wenn es sich um die ruhende Feder handelt.

Im aktiven Zustand einer Handfeder bewirkt der von vorn kommende, mehr oder weniger senkrecht zur Flügelvorderkante verlaufende Fahrtwind bzw. Anblaswind ein engeres Zusammenrücken der Außenfahnenäste. Dies trifft insbesondere für diejenige Feder zu, deren Außenfahne unmittelbar vom Luftstrom getroffen wird; das ist zunächst die äußerste Handschwinge mit der gesamten Außenfahne; dazu kommen die Schwungfedern, von denen nur der distale Außenfahnenbereich frei im Luftstrom steht und deren Federspitzen im Flugbild deutlich die geschlossene Flügelfläche als Fingerring überragen.

Die Anströmung läßt sich als senkrecht zur Federachse wirkende Kraft K in die beiden Teilkräfte K_1 (senkrecht zur Astichtung verlaufend) und K_2 (in Astichtung zur Astbasis zeigend) zerlegen. Unter Berücksichtigung des Schaftastwinkels lassen sich dann für die Außenfahne folgende Beziehungen ableiten:

$$K_1 = K \cdot \cos \alpha$$

$$K_2 = K \cdot \sin \alpha$$



Aus beiden Formeln ist die Bedeutung eines möglichst kleinen Schaftastwinkels ersichtlich:

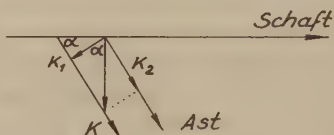
Die Komponente K_1 begünstigt das Zusammenrücken der Federäste zum Schaft hin und nimmt mit kleiner werdendem Astwinkel zu.

Die Komponente K_2 fördert zwar ungünstiges Beulen und Knicken der Äste, nimmt aber mit kleiner werdendem α ab.

Für die Innenfahne führt das Kräfteparallelogramm zu Teilkräften K_1 und K_2 , die mit der Winkelstellung der Innenfahnenäste folgendermaßen zusammenhängen:

$$a) K_1 = K \cdot \cos \alpha$$

$$b) K_2 = K \cdot \sin \alpha$$



Formel a) spricht für möglichst große Winkel α , denn K_1 bewirkt ein Auseinanderzerren der Äste, beansprucht daher stark den Verhakungsmechanismus und nimmt nur mit wachsendem Winkel α ab!

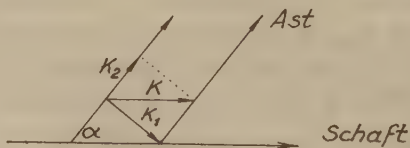
Die Komponente K_2 greift an der Astbasis an und übt einen Zug in Längsrichtung der Äste aus, der letztlich zu einer Flächenstabilisierung führt. Die Zugkraft wächst mit dem Winkel α , wie aus Formel b) hervorgeht.

Die Strömungsverhältnisse an den körpernäheren Armschwingen, an den Stoßfedern und an allen übrigen Deckfedern des Vogelkörpers sind so beschaffen, daß die Federn mit ihren Achsen mehr oder weniger in der Strömungsrichtung des Windes liegen und somit dem vorbeistreichenden Wind wenig Angriffsfläche bieten.

Das bedeutet also, daß an den Außenfahnen der linken und rechten äußeren Stoßfedern der Windstrom parallel zur Kiellinie vorbeistreicht, ohne diese - wie bei den äußeren Handschwingen - senkrecht zu treffen. Der in Schafttrichtung verlaufende Windstrom läßt sich wieder in die Komponenten K_1 und K_2 zerlegen:

$$a) K_1 = K \cdot \sin \alpha$$

$$b) K_2 = K \cdot \cos \alpha$$

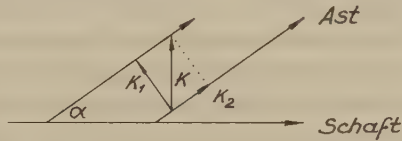


Hier zeigt sich, daß die Kraft K_1 , welche das Zusammenrücken der Äste fördert, mit der Größe des Winkels steigt, während K_2 , an der Astbasis angreifend und die Äste in Astrichtung ziehend, dabei abnimmt. Da K_2 als Zugkraft eine Art flächenstabilisierende Wirkung ausübt, dürfen K_1 und somit die Astwinkel nicht zu groß werden.

Für die Reibungskräfte an der Außenfahne einer Feder, die mit ihrem ventralen Fahnenrand über die dorsale Innenfahnenfläche der darunterliegenden Feder hinwegstreicht, lassen sich ebenfalls Teilkräfte angeben:

$$a) \quad K_1 = K \cdot \cos \alpha$$

$$b) \quad K_2 = K \cdot \sin \alpha$$



Die senkrecht zur Astrichtung wirkende Kraft K_1 beansprucht stark den Verhakungsmechanismus der Strahlen und gefährdet den Fahnenzusammenhalt. Sie nimmt ab, wenn der Winkel α größer wird. Die flächenstabilisierende Zugwirkung von K_2 dagegen steigt mit der Größe des Winkels α an. Große Winkel der Außenfahnenäste sind daher aus Reibungsgründen günstig.

Bezüglich der Reibungskräfte an den Innenfahnen, die auch durch Schaftreibung mitverursacht werden, erhalten wir Kräfteverhältnisse, die dem durch Luftströmung bedingten Kräfteparallelogramm ähnlich sind.

Die Komponente K_1 , die ein Auseinanderreißen der Äste fördert, nimmt mit größer werdendem Astwinkel ab; daher sind auch für die Reibungskräfte große Winkel der Innenfahnenäste günstig. Solche großen Winkel führen andererseits zu großen Zugkräften K_2 an den Ästen und tragen ebenfalls zur Flächenstabilisierung bei.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die durch Windströmung und Reibung in der Federfahne hervorgerufenen Kraftwirkungen besondere Winkelstellungen der Äste bedingen.

Die Strömungsverhältnisse erfordern bei den der Flügelkante nahe liegenden Handfedern in der Außenfahne kleine Astwinkel, in der Innenfahne große Astwinkel.

Bei den Armschwingen, den Steuerfedern und übrigen Körperdeckfedern sind wegen der in Schafttrichtung verlaufenden Strömungskräfte gleiche Winkel an If und Af günstig, die bei den zusätzlich der Reibung unterliegenden Federn möglichst groß sein sollen. Die Reibungskräfte an den äußeren Schwungfedern des Flügels erfordern in der Außenfahne große Winkel, die dem strömungsgünstigen Prinzip kleiner Winkel widersprechen.

Besonders eindrucksvoll bestätigen sich beide Prinzipien an den Flügelfedern, deren Außenfahne funktionell in einen vom Luftstrom unmittelbar getroffenen Distalbereich und in einen der Fühlungnahme mit der Nachbarfeder dienenden Proximalbereich getrennt ist. Es sind dies die auf die äußerste Handschwinge folgenden Schwungfedern vieler Vogelarten.

Die 4. Handfedern von Uhu, Steinadler und Sperber beispielsweise zeigen, wie die großen Winkel der Reibungszone des proximalen Fahnenbereichs beim Übergang zum freien distalen Fahnenabschnitt sprunghaft kleiner werden, ohne daß dabei eine entscheidende Änderung der Flächendichte eintritt. Die konstanten D' -Werte im Übergangsbereich führen dann zur Proportionalität von $\sin \alpha$ und D .

Daraus ist zu schließen, daß unterschiedliche Astdichten in diesem Grenzbereich keine besondere funktionelle Bedeutung haben und sie lediglich als Folge der unterschiedlichen Winkelstellung auftreten.

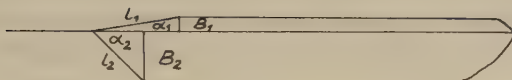
Einige Werte:

Beim Uhu sinken infolge veränderter Winkelstellung die D -Werte von 2 auf 1, beim Sperber von 1,4 auf 0,5; beim Steinadler von 1,3 auf 0,8. (Abb. 20)

Die Innenfahnen der Schwungfedern weisen mehr oder weniger große Schaftastwinkel auf und entsprechen damit den oben genannten reibungs- und strömungstechnischen Erfordernissen.

Eine Folge der Winkelstellung ist die auffällige Schmalheit der Außenfahne einer Schwungfeder gegenüber der Innenfahne.

Setzen wir einmal gleiche Astlängen l von Innenfahne und Außenfahne voraus, dann hängt die Fahnenbreite B vom Winkel α ab.



Aus $\sin \alpha = B/l$ ist ersichtlich, daß B mit kleinerem α abnimmt und deswegen eine schmale Außenfahne bedingt (zusätzlich sind in Wirklichkeit die Außenfahnenäste kürzer als die Innenfahnenäste). Nach HERTEL entspricht die unterschiedliche Fahnenbreite von I_f und A_f aerolastischen Erfordernissen.

Neben den allgemein gültigen Winkelverhältnissen treten bei den einzelnen Vogelarten von Fall zu Fall Besonderheiten in der Astwinkelstellung auf, die sich vorwiegend bei den Handschwingen bemerkbar machen. So reicht beispielsweise in der Außenfahne der 1. Handschwinge die Winkelskala von extrem kleinen bis zu großen Werten. Besonders deutlich werden die Winkelunterschiede beim Vergleich Schleiereule und Sperber (Tab. 23,24):

in Fahnenmitte treten bei der Sperberfeder Winkel von 6° auf, bei der Schleiereule Winkel von 34° .

Die Unterschiede der Innenfahnenwinkel sind weniger gravierend und betragen beim Sperber im mittleren Fahnenbereich 36° , bei der Schleiereule 49° .

In der Reihenfolge Sperber, Auerhahn, Mauersegler, Turmfalke, Dohle, Graugans, Goldhähnchen, Zaunkönig, Graureiher, Steinkauz, Waldkauz, Steinadler, Waldohreule, Uhu und Schleiereule steigen die Außenfahnenastwinkel der 1. Handschwinge an, während die Winkel der Innenfahne eine ähnliche Tendenz nicht mehr genau erkennen lassen.

Allerdings bilden die Eulen auch hier die Vogelgruppe mit den höchsten Werten.

Ob ein funktioneller Zusammenhang zwischen diesen extremen Werten und dem Flugvermögen vorliegt, ist schwer zu beantworten.

Eine hohe Fluggeschwindigkeit bedingt einen starken Anblaswind und somit auch große Kräfte in den Außenfahnen. Da beim Fliegen kleine Außenfahnenwinkel die Festigkeit der Feder in der Außenfahne erhöhen (siehe nächstes Kapitel), wird bei erhöhter Belastung der Feder eine durch kleinere Winkel ausgezeichnete Feder-außenfahne begünstigt.

Es ist anzunehmen, daß die durch die Anblasgeschwindigkeiten hervorgerufenen Kräfte in einem Bereich liegen, der den Außenfahnenästen in ihrer Stellung zum Schaft einen gewissen Spielraum erlaubt.

Was die Winkelstellung im allgemeinen angeht, darf nicht verschwiegen werden, daß vorwiegend bei den Armschwingen, mittleren Stoßfedern und den anderen Körperdeckfedern auf engem Fahnenbereich Winkelunterschiede auftreten, denen meistens schwankende Flächendichten und Astdichten zu Grunde liegen. Der Quotient D/D' bestimmt ja nach $\sin \alpha = D/D'$ die Winkelstellung.

Bei stark gebogenen Schwungfedern (z.B. 1. und 2. HS von Auerhahn) führt die Krümmung des Schaftes im distalen Bereich bei konstanter Flächendichte zum Anwachsen der Af-Winkel, wie leicht einzusehen ist, wenn wir die Winkelberechnung durchführen:

Im proximalen Außenfahnenbereich (Pos. 6) der 1. Handschwinge (Tab. 25) des Auerhahns beträgt bei einer Flächendichte von 5,3 und einer Astdichte von 0,7 der Winkel 8° ($\sin \alpha = 3/22$), im distalen Bereich (Pos. 15) beträgt der Winkel 16° bei einer Flächendichte von 5,0 und einer Astdichte von 1,3 ($\sin \alpha = 4/15$).

2. Die Astdichte D

Die Schaftastrate gibt an, wieviele Äste pro 1 mm Schaftlänge die Federfahne bilden (shaft-barb-frequenzy, FRAPS und JUHN, 1937).

Nicht bei allen Autoren, die sich mit der Astdichte beschäftigen, wird die Zahl der Äste entlang des Schaftes auf diese Weise untersucht. SICK beispielsweise vergleicht auf gleicher Schaftlänge die Anzahl der Außenfahnenäste mit der Anzahl der Innenfahnenäste und stellt dabei bei Gyps (1.HS) ein auffälliges Mißverhältnis in der Anzahl von Außen- und Innenfahnenästen fest, "das proximal der Längenmitte der Feder am auffälligsten ist, wo auf 15 Rami der Innenfahne nur 10 der Außenfahne kommen. Gegen die Basis und gegen die Spitze werden die Astzahlen geringer; um 1 unterscheiden sich die beiden Seiten aber fast immer".

In diesem Zusammenhang weist SICK noch auf die an Außen- und Innenfahne ungleiche Winkelstellung der Rami zum Schaft hin, ohne jedoch den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen Astdicke und Winkelstellung zu kennen.

Wählt man zur Untersuchung der Astdicke den gleichen Weg wie SICK, so lassen sich z.B. in Fahnenmitte der 1. HS von Walddohreule, Waldkauz, Schleiereule und Stockente folgende Astzahl-differenzen feststellen:

Walddohreule: Auf 10 Rami der Innenfahne kommen 4,5 Rami der Außenfahne; Differenz 5,5

Waldkauz: Auf 10 Rami der If kommen 4,2 Rami der Af; Differenz 5,8

Schleiereule: Auf 10 Rami der If kommen 6,6 Rami der Af; Differenz 3,4

Stockente: Auf 10 Rami der If kommen 5,7 Rami der Af; Differenz 4,3

Die Astzahldifferenz nimmt mit wachsender Entfernung der Feder von der Flügelvorderkante ab:

Walddohreule: 7. Handschwinge, mittlerer Fahnenbereich.
Auf 10 Rami der Innenfahne kommen 8,3 Rami der Außenfahne. Astzahldifferenz 1,7.
Astzahldifferenz im mittleren Fahnenbereich der 1. Handschwinge 5,5.

Stockente: 7. Handschwinge, mittlerer Fahnenbereich.
Auf 10 Rami der Innenfahne kommen 8 Rami der Außenfahne. Astzahldifferenz 2,0.
Astzahldifferenz im mittleren Fahnenbereich der 1. Handschwinge 4,3.

In den Abb. 29-34 sind ausnahmsweise neben den Dicke-Werten die Astlängen wiedergegeben. Das Gesamtbild der Feder entspricht aber nicht dem wahren Federumriß, da die Äste in Wirklichkeit nicht rechtwinklig am Schaft inserieren und der Schaft im allgemeinen etwas gebogen ist. Die Astdicken stellen außerdem nur Mittelwerte dar, so daß die Grenzlinie ihrer Werte die auf engem Schaftbereich auftretenden Dichteschwankungen nicht berücksichtigt.

Die größten Astzahldifferenzen finden sich in den von mir unter-

suchten Federn in den 1. Handschwingen von Sperber und Ziegenmelker. In Fahnenmitte liegen bei beiden Vogelarten Astzahl-differenzen von 8,5 vor.

Diese Astzahl-differenz nimmt beim Sperber über 6,5 der 4. Hand-schwinge, 2,0 der 8. Handschwinge bis zum Wert 0 der 7. Armschwinge ab und macht die oben erwähnte Tendenz deutlich.

Die gesetzmäßige Beziehung zur Berechnung der Astdichte lautet:

$$D = D' \cdot \sin \alpha$$

Die Formel beweist, daß die Astdichte mit dem Produkt aus $\sin \alpha$ -Wert und Flächendichte D' in einem funktionalen Zusammenhang steht, der die Abhängigkeit der Größen voneinander widerspiegelt.

Maximale Astdichten treten dort auf, wo große Winkel und hohe Flächendichten vorliegen. Dies ist im proximalen Bereich von Außen- und Innenfahne der Fall. Hier finden sich die größten Winkel und Flächendichten einer Feder, wobei auch Maximalwerte von 90° häufig sind. Die Tatsache des stetigen Abnehmens der Winkel von proximal nach distal bei verhältnismäßig konstanter Flächendichte erklärt auch die Abnahme der Astdichten von proximal nach distal; ferner bringen die Unterschiede in der Winkelstellung von Innen- und Außenfahnenästen und die Winkeländerungen in den Hand-, Arm- und Steuerfedern eines Vogels ein entsprechendes Verhalten der Astdichten mit sich.

Daraus ergibt sich:

- a) Unterschiedliche Astdichten innerhalb des Federkleides treten im Zusammenhang mit unterschiedlicher Winkelstellung der Äste auf, wenn die Flächendichte konstant bleibt.
- b) Verschiedenartige Astdichten einander entsprechender Federn unterschiedlicher Vogelarten haben bei ähnlicher Winkelstellung ihre Ursache in unterschiedlichen Flächendichten.

Innerhalb der 3 Größen Flächendichte, Astdichte und Winkelstellung scheinen Flächendichte und Winkelstellung eine Sonderstellung einzunehmen.

Aus entwicklungsphysiologischen Gründen kann meiner Meinung nach die Flächendichte bei bestimmter Astbreite einen Maximalwert nicht überschreiten, weil in der Federanlage die Äste dicht aufgerollt liegen und je durch Zellgruppen getrennt sind, die bei der Verhornung nicht aneinander haften bleiben wie die Zellen der Äste,

sondern bei der Federentfaltung als Einzelelemente aus dem ganzen Verband ausscheiden und wie Staub- oder Puderteilchen sich zerstreuen.

Wenn aus bestimmten Gründen hohe Astdichten erforderlich sind, geht das allein durch Vergrößerung von α , sobald das Flächendichte-Maximum erreicht ist.

Da die Winkelstellung keinen direkten Einfluß auf die Flächendichte hat, die spezielle Lage einer Vogelfeder aus strömungs- und reibungstechnischen Gründen jedoch eine bestimmte Winkelstellung der Äste erfordert und gleichzeitig in allen Federn spezielle Flächendichten vorliegen, sind die Astdichten der Federn lediglich der Ausdruck für den gesetzmäßigen Zusammenhang von Flächendichte und Schaft-Astwinkel.

Unterschiede in den Astdichten einander entsprechender Federfahnenbereiche verschiedener Vogelarten ergeben sich

- bei gleicher Winkelstellung aus unterschiedlichen Flächendichten

Beispiel: 1. HS von Gartenrotschwanz und Turmfalke. (Abb. 26 u.5)

In Pos. 3 der If des Gartenrotschwanzes liegt die
Astichte 3,6 vor

$$D' = 6,6 \quad \alpha = 34^\circ$$

In Pos. 4 der If des Turmfalken tritt eine Astichte
von 2,6 auf

$$D' = 4,7 \quad \alpha = 34^\circ$$

- Bei gleicher Flächendichte aus unterschiedlichen Winkeln

Beispiel: Af der 4. HS von Sperber und Turmfalke (Tab. 35, Abb.8)

Pos. 7 des Sperbers Pos. 8 des Turmfalken

$$D = 0,7 \quad D = 1,7$$

$$D' = 3,2 \quad D' = 3,2$$

$$\alpha = 13^\circ \quad \alpha = 32^\circ$$

- Bei unterschiedlichen Winkeln und unterschiedlicher Flächendichte aus dem Produkt $\sin \alpha \cdot D'$.

Beispiel: If der 1. HS von Uhu und Steinadler (Abb. 18 u. 21)

Pos. 11 des Uhu Pos. 11 des Steinadler

$$D = 2,7 \quad D = 1,7$$

$$D' = 4,0 \quad D' = 2,9$$

$$\alpha = 43^\circ \quad \alpha = 35^\circ$$

Es fällt auf, daß die Eulenvögel sehr hohe Astdichten besitzen. Dies war auf Grund ihrer großen Schaftastwinkel zu erwarten. Daß in Verbindung mit großen Astdichten große Schaftastwinkel bei den Eulen auftreten, muß sicher eine funktionelle Bedeutung haben.

Die Eulen stellen auf Grund ihrer nächtlichen Lebensweise (zusammen mit den Ziegenmelkern) eine Vogelgruppe dar, deren Federn besondere morphologische Baumerkmale besitzen müssen, da sie im Sinne von SEWERTZOFF (1931) ektosomatische Organe sind, die in korrelativer Beziehung zur Umwelt stehen. Bereits GADOW (1891) schildert die Eulen als nächtliche Raubvögel, "die meist nur in der Abend- und Morgendämmerung oder in mondhellen Nächten auf Raub ausgehen... Ihre breiten Flügel und ihr großes, lockeres Gefieder machen, daß sie außerordentlich leise und ohne alles Geräusch fliegen und so ihre Schlachtopfer desto besser überraschen können."

Die Weichheit des Federkleides einer Eule wird in erster Linie durch die weich gestaltete Konturfeder bedingt, von deren Struktur zwei wichtige Faktoren für die Weichheit verantwortlich sind: die Äste und die Strahlen.

Die Untersuchung der Biegsamkeit der Äste bleibt den späteren Kapiteln vorbehalten.

Hier soll zunächst die Winkelstellung der Äste und ihre Dichte näher untersucht werden. Wie bereits erwähnt, zeichnen sich die Schwungfedern der Eulen durch große Schaftastwinkel und Astdichten von allen übrigen Vogelarten aus.

Eine weitere Besonderheit stellt die Zähnelung der Eulenschwinge dar. Es ist die charakteristische Umgestaltung der Rami der Außenfahne einer Handschwinge, die bereits MASCHA beschreibt. Hier läuft jeder einzelne Ramus in einen Haken aus, so daß die Vorderkante insgesamt zu einem feinen Kamm aufgelöst ist.

Die Zähnelung findet sich auch bei einigen Caprimulgiden, ebenso wie die Striges Nachtflieger. Bei den Eulen lassen sich hinsichtlich der Güte der Zähne zwei Gruppen unterscheiden (vgl. SICK 1937).

Zur ersten, stark gezähnten Gruppe zählen Tyto, Bubo, Strix, Asio; zur zweiten, schwächer gezähnten Gruppe Athene.

Bis einschließlich zur 3. Handschwinge sind nur Bubo und Strix stark gezähnt; Asio ist an der 3. Handschwinge nicht mehr gezähnt.

Eigene Beobachtungen an der ersten Handschwinge einer Walddohr-eule stimmen nicht überein mit denen von HERTEL, der den Hakenkamm folgendermaßen beschreibt: "Die etwa 2 mm langen freien Astenden sind um etwa 65° in die Richtung senkrecht zur Vorderkante gebogen; diese Haken bleiben in der Fahnenebene. Die Astenden laufen sehr spitz zu und sind auf einer Seite mit Strahlen versehen, die nach außen immer kürzer werden."

Schon bei genauerem Betrachten der von HERTEL beigelegten Mikro-aufnahmen der Asthaken wird man feststellen, daß die Beschreibung der Struktur unzutreffend ist.

Die etwa 3 - 4 mm langen Zähne liegen nicht in der Ebene der Fahnenfläche, sondern überragen diese nach federdorsal. So kann beim Uhu nach eigenen Beobachtungen der maximale Abstand des äußersten Punktes einer Zahnspitze von der Außenfahnenebene immerhin 4 mm betragen (s. Abb. 36).

Die Aufbiegung der Rami, die schon SICK kurz erwähnt, findet sich bestätigt bei Steinkauz (hier etwas schwächer), Schleiereule und Waldkauz.

Die Ramihaken haben bilateral ansitzende Strahlen, die gegen die Zahnspitze zu immer kürzer werden.

Die Stellung der Ramusenden im Bereich der Zähne ist durch eine Torsion gekennzeichnet. Diese bewirkt in Verbindung mit der Ramusaufbiegung eine an der Asthakenbasis beginnende Heraushebung der Ramusfahne aus der Ebene der Außenfahne. Mit zunehmender Entfernung von der Basis wird der Winkel zwischen Außenfahnenebene und Ramusfahnenebene immer größer und erreicht an der Zahnspitze schließlich ca. 90° (s. Abb. 38).

Die distalen Strahlen eines Asthakens liegen also in einer Ebene, die senkrecht auf der Außenfahne steht und deren Schnittkante (mit der Außenfahnenebene) rechtwinklig zur Flügelvorderkante verläuft. Die Torsion ist zur Federbasis gerichtet (von federdorsal gesehen), demzufolge weisen die Proximalen Strahlen eines Asthakens nach federvertral, die Distalradialen nach federdorsal.

Eine Verankerung der Asthaken untereinander durch die Strahlen wäre schon auf Grund der räumlichen Anordnung der Ramusfahnen unmöglich.

Weitere interessante Einzelheiten über den Bau der Eulenschwingenzähnelung ergaben sich bei der mikroskopischen Betrachtung des Hakenkammes von *Asio otus*. An der Spitze mancher Zähne findet sich hier eine haarartige Bildung, die einige winzige Fortsätze ausbilden kann.

Es handelt sich bei dieser Feinstruktur um das über die Radienzzone weit hinausragende Endstück eines Ramus. Das Gebilde ist haarartig fein und man könnte es als Ramusborste oder Ramuswimper bezeichnen.

Die Funktion des Hakenkammes ist noch ungeklärt.

SICK glaubt, daß die Zähnelung beim Flügelschlag dem Luftstrom die Möglichkeit zum Entweichen gibt, und zwar dem Anteil Luft, der an der geschlossenen Flügelvorderkante ein geräuschvolles Sausen erzeugt.

HERTEL (1964) vermutet eine Grenzschichtbeeinflussung der Luft durch den feingliedrigen Kamm, der bei den Eulen ähnlich wie der Vorflügel bei den Flugzeugen wirksam sein könnte.

Er hält es für möglich, daß der Hakenkamm die Aufgabe hat, die Grenzschicht so zu beeinflussen, daß Ablösungen und andere mit Geräusch verbundene Vorgänge verhindert werden. Damit die Eulen in der Nacht geräuschlos jagen können, sind nach HERTEL insgesamt drei Besonderheiten im Federbau für die Geräuschkämpfung verantwortlich:

- a) "Polsterung auf Federoberseite durch feinen Flaum zum lautlosen Gleiten der Federn aufeinander.
- b) Grenzschichtbeeinflussung an der Flügelvorderkante durch einen feingliedrigen Kamm, den die vorderste und die zweite Feder haben.
- c) Schalldämpfer an der Flügelhinterkante durch Fransenverlängerung der hinteren Fahnenäste an den hintersten Federn."

Die Ansicht, daß der Hakenkamm auf das normale Fluggeräusch dämpfend wirkt, ist inzwischen durch Arbeiten von NEUHAUS und BRETTING (1973) widerlegt worden.

Fluggeräusche sind strömungsbedingt und rühren von der Grenzschicht, Turbulenzen, Wirbeln und Ablösungen her (HERTEL). Wie Windkanalversuche von NEUHAUS und BRETTING ergeben haben, tritt über der Kammstruktur eine Verwirbelungszone auf, die vermutlich von dieser Federstruktur erzeugt wird und den Effekt hat, die Strömung kurz vor dem Abreißen wieder zum Anliegen an den Flügel zu bringen. Nach dem Abschneiden des Hakenkammes liegt nämlich die Strömung dem Eulenflügel nicht mehr so gut an wie vorher.

Da bei normalen Anstellwinkeln der Hakenkamm keinen Einfluß auf die Geräuschbildung hat, ist eine Beeinflussung bei kritischen Anstellwinkeln denkbar, wie sie beim Wenden oder Rütteln auftreten. Frequenz- und Intensitätsanalysen der Fluggeräusche bei Eulen mit und ohne Hakenkammstruktur deuten auf die Gültigkeit dieser These hin.

Durch den aerodynamischen Effekt des Laminarhaltens der Strömung dient der Hakenkamm offensichtlich dazu, eine übermäßige Erhöhung der Schlagfrequenz und somit der Anströmgeschwindigkeit zu vermeiden. Er beeinflusst somit nur indirekt das Fluggeräusch.

Seine Bedeutung als Auftriebshilfe erhält der Hakenkamm sicherlich durch die spezielle Anzahl der Asthaken entlang der Flügelvorderkante, also durch die Asthakendichte. Da im Vergleich zum Flügelganzen ein einzelner Asthaken morphologisch unbedeutend erscheint, ist zu vermuten, daß nur eine möglichst große Asthakendichte in der Lage ist, Verwirbelungen hervorzurufen und für den Auftrieb bei kritischen Anstellwinkeln günstig zu wirken.

Wie groß die Anzahl der Asthaken entlang des Fahrenrandes mindestens sein muß, um aerodynamische Funktionen zu erfüllen, ist nicht bekannt.

Diese Zahl ist meiner Meinung nach bereits durch die gegebenen morphologischen Verhältnisse der Eulenfeder festgelegt. Sie beträgt bei der Waldohreule ca. 1,4 und läßt sich z.B. aus dem Abstand Δ der Zahnsitzen errechnen, der von HERTEL mit 0,7 mm angegeben wird. Setzt man nämlich in die Formel $D = 1/a$ für $\Delta = a$, so erhält man $D = 1/0,7$ ca. 1,4.

Die Asthakendichte ist mit 1,4 bei der Waldohreule ziemlich hoch und wird nach meinen Beobachtungen von Uhu, Waldkauz und Schleiereule noch übertroffen, deren Astdichten Werte bis 2,0 aufweisen können.

Das Auftreten derartiger Astdichten entlang der Vorderkante ist bei den Eulen morphologisch an das Vorhandensein großer Schaftastwinkel in der Außenfahne gebunden. Dies läßt sich nach dem Federgesetz $D = D' \cdot \sin \alpha$ leicht einsehen, wenn wir die Zahl der Asthaken nicht auf die Schaftlänge, sondern auf die parallel zum Schaft verlaufende Außenfahnenkantenlänge beziehen.

Denkt man sich dabei die Bezugsachse so gelegen, daß sie noch in der Außenfahnnenebene kurz vor beginnender Asthakenbildung verbleibt, so ergeben sich in Federmitte beim Uhu Astdichten von ca. 2,0, bei der Schleiereule von ca. 1,8.

Bei Steinadler und Auerhahn treten dagegen Werte von 0,6, bei der Stockente von 0,5 auf.

Setzen wir hypothetisch eine ähnliche Asthakenbildung bei Steinadler, Auerhahn und Ente voraus, so würden bei den genannten Eulen dreifach größere Asthakendichten gegenüber den anderen Vogelarten auftreten, obwohl die Eulen z.B. eine geringere Astflächendichte aufweisen als beispielsweise der Auerhahn.

Diese Vogelart besitzt in der Außenfahne Flächendichten von 7 und damit die doppelte Anzahl von Ästen pro Fahnenflächeneinheit gegenüber der Schleiereule, die D' -Werte von 3,5 aufweist.

Nichts beweist also die Bedeutung großer Schaftastwinkel für maximale Astdichten entlang der Fahnenkante besser als die Tatsache, daß trotz erheblich geringerer Flächendichten die Astdichte der Schleiereule am Fahnenrand dreimal so groß ist wie beim Auerhahn. (Abb. 39)

Die größere Winkelstellung der Außenfahnenrami der Eulen zugunsten der Asthakendichten konkurriert natürlich mit der aus strömungstechnischen Gründen erforderlichen Schrägstellung der Äste, so daß eine übermäßig große Winkelstellung der Außenfahnenäste zum Schaft vermieden werden muß. Sie würde zwar maximale D -Werte bei morphologisch bedingten, speziellen Flächendichten hervorrufen, jedoch zu unangenehmen Druckwirkungen auf die Äste bei Flugbeanspruchung führen. Damit stellt die besondere Baustruktur der Außenfahne der 1. HS bei den Eulen gewissermaßen eine Kompromißlösung dar, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Für die Schwungfederinnenfahne der äußeren Handschwingen einer Eule läßt die relativ große Winkelstellung der Äste entsprechend hoher Ramusdichten eine funktionell andere Deutung zu.

Die Kiele der ersten Handschwingen liegen in Ruhe nahezu parallel untereinander und zur Flügelvorderkante. Bei der Flugbewegung kommt es nun zur Schaftreibung, wobei z.B. der Schaft der 3. Handschwinge die Oberfläche der 2. Handschwinge reibt. Dabei auftretende Reibungsgeräusche werden bei den Eulen durch be-

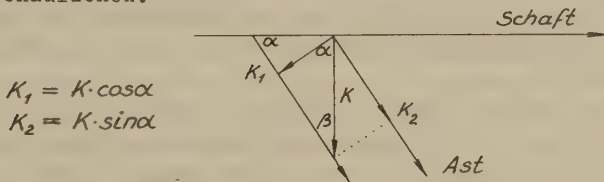
sondere Weichgestaltung der Fahne gedämpft. Man kann durch folgenden kleinen Versuch nachweisen, daß die bei Schaftreibung auftretenden Geräusche auch von der Winkelstellung der Äste abhängen:

Ein von seinen Ästen befreiter Federkiel wird auf der Innenfahne einer beliebigen Schwungfeder parallel zu deren Schafttrichtung verschoben

- a) in senkrechter Richtung zum Schaft,
- b) in Richtung der Äste.

Im Fall a) wird sich ein bedeutend stärkeres Reibgeräusch bemerkbar machen.

Da bei den Eulen die Astrichtungen auf Grund der großen Schaftastwinkel nahezu identisch sind mit der Verschiebungsrichtung der Federschäfte bei Flugbeanspruchung, haben sie eine für die Geräuschdämpfung optimale Stellung. Mit Hilfe eines Kräfteparallelogramms lassen sich die Wirkungen der Reibkräfte gut veranschaulichen.



Es zeigt sich, daß die Kraftkomponente K_1 , die das Auseinanderreißen der Fahnenäste fördert, mit zunehmender Größe von α abnimmt und damit auch die Fahnenfestigkeit weniger stark erniedrigt als bei kleineren Astwinkeln. Aus $\beta = 90^\circ - \alpha$ folgt außerdem, daß β anwächst, wenn α kleiner wird. Die Kraftkomponente K_1 , die senkrecht auf die dorsale Kante eines Federastes trifft und die meiner Meinung nach für eine erhöhte Geräuschbildung verantwortlich zu machen ist, steigt mit zunehmendem Winkel β an. Der Winkel β , der den Unterschied von Astrichtung und Reibrichtung wiedergibt, zeigt, welche Bedeutung kleine Winkel für das geräusch-günstige Gleiten der Federfahnen aufeinander haben.

Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß an den Schwungfedern der Eulen (und Ziegenmelker) nach SICK andere Reibungsvorgänge herrschen als bei den übrigen Vogelarten. Die aufliegende Feder rastert nicht auf Fortsätzen der Reibungsradien, sondern

wird in die weichzottige Fahnenoberfläche gepreßt, die durch eine außerordentliche Verlängerung und Aufbiegung der Pennula erzielt wird. Eine Schaftreibung im oben genannten Sinn findet nach SICK nicht statt. Die Richtung der Reibungskräfte ist aber trotzdem die gleiche wie die im Kräfteparallelogramm angegebene.

Zum Abschluß der Betrachtungen über die Astdichten der Eulen soll noch ein kurzer Vergleich zwischen den Eulen und Nachtschwalben angestellt werden, da ja beide Vogelgruppen eine nächtliche Lebensweise führen und entsprechende Anpassungen in ihrer Federstruktur aufweisen.

Wir betrachten die 1. HS von Waldkauz und Ziegenmelker (Abb.40,41). Beide Federn stimmen in der Fahnenlänge überein, unterscheiden sich jedoch durch ihre unterschiedliche Fahnenbreite. Die Feder des Waldkauzes ist bedeutend größer. Aus den Abbildungen geht hervor, daß in der Außenfahne der Waldkauz viel größere Schaftastwinkel besitzt als der Ziegenmelker. Das Ergebnis ist nicht überraschend, da der untersuchten Nachtschwalbenart die Hakenkammstruktur fehlt und somit eine große Winkelstellung zu Gunsten höherer Astdichten nicht notwendig ist.

Interessant ist, daß der Ziegenmelker trotz größerer $Af-D'$ -Werte kleinere Astdichten als der Waldkauz aufweist, was die Bedeutung der Winkelstellung für die Astdichte erneut unterstreicht. In den Innenfahnen ähneln sich beide Vogelarten und sind durch große Winkel optimal den oben genannten geräuschkämpfenden Erfordernissen angepaßt.

3. Die Flächendichte D'

$$D' = D/\sin\alpha$$

Die Maßzahl der Flächendichte entspricht dem Quotienten $D/\sin\alpha$. Maximalwerte von D' bei großem α bedeuten gleichzeitig große Dichten und finden sich im proximalen Fahnenbereich der Konturfedern. Auch bei $\alpha = 90^\circ$ ($\sin\alpha=1$) ist das weitere Ansteigen von D' möglich, wenn es die morphologischen Verhältnisse erlauben.

Zwischen Innen- und Außenfahne der äußersten Schwungfeder bestehen bezüglich der Flächendichte folgende Verhältnisse:

Bei Goldhähnchen,

Auerhahn,

Mauersegler,

Graureiher,

Steinadler,

Ziegenmelker,

hat die Außenfahne, bei

Graugans,

Schleiereule,

Steinkauz,

Waldkauz,

Gartenrotschwanz,

Uhu

hat die Innenfahne größere D' -Werte.

Bei den körpernäheren Schwingen ist bei vielen Vogelarten ein Abnehmen der Flächendichte festzustellen, das jedoch gelegentlich durch erneutes Anwachsen der D' -Werte unterbrochen sein kann.

Eine allgemein gültige Regel für das Verhalten der Flächendichte im Federkleid eines Vogels läßt sich daher schwer finden.

Beim Vergleich der Federn verschiedener Vogelarten ist allerdings festzustellen, daß jedem Vogel ein ganz spezifischer Wertbereich der Flächendichte zukommt.

Die Wertbereiche umfassen in den 2. HS die Spanne

6 - 9 bei Goldhähnchen

6 - 7 bei Zaunkönig

4 - 6 bei Waldkauz, Steinkauz

4 - 5 bei Auerhahn, Waldohreule, Dohle

3 - 5 bei Mauersegler

3 - 4 bei Schleiereule, Uhu

2 - 3 bei Steinadler

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, daß offensichtlich keine Beziehung zwischen der Flächendichte in Schaftnähe und der Körpergröße eines Vogels besteht. Auch innerhalb verwandter Vogelarten treten Unterschiede auf.

Eine Erklärung dafür findet sich, wenn wir für die Flächendichte setzen: $D' = 1/(b+d)$ (9)

Die Flächendichte wächst mit kleinerem Nenner $(b+d)$. Die Größe des Nenners richtet sich nach der Astbreite b und dem Astabstand d . Für $d=0$ erhält man bei der Astbreite b den Maximalwert $D' = 1/b$. Dieser Wert wird annähernd nur von den proximalen Ästen der Federfahne erreicht.

Bei großen Vögeln wäre zu erwarten, daß infolge der langen und kräftigen Federkiele auch breite Äste auftreten, denen starke Radien mit langen Basallamellen entsprechen.

Neben größeren b -Werten sollten dann auch größere d -Werte auftreten, so daß durch den großen Nenner $(b+d)$ kleine D' -Werte bedingt wären. Demnach müßten schwere Vögel eine kleinere Flächendichte aufweisen als leichte Vögel.

Wie die Auerhahnfeder beweist, trifft dies nicht immer zu. Es ist denkbar, daß die Radienausbildung eigene Wege geht, die trotz kräftiger Astbreiten zu einem engeren Zusammenrücken der Äste führen, also eine große Flächendichte hervorrufen.

Bei gleichem D' lassen sich also folgende Fälle unterscheiden:

- a) Große Astbreite - kleiner Astabstand.
- b) Kleine Astbreite - großer Astabstand.
- c) Mittlere Astbreite - mittlerer Astabstand.

Wenn wir einmal annehmen, daß die Höhe eines Astes im gleichen Maße zunimmt wie die Astbreite, sind -unter Vernachlässigung der Radien- im Fall a) sehr feste Federfahnen,
im Fall b) sehr weiche Federfahnen,
im Fall c) weniger feste Federfahnen zu erwarten.

Welchen Einfluß nun tatsächlich die Flächendichte D' auf die Festigkeit der Fahne hat und welche Faktoren grundsätzlich für die Festigkeit einer Feder verantwortlich sind, soll im folgenden Kapitel näher untersucht werden.

II. DIE FESTIGKEIT DER FEDERFAHNE

A. Ableitung einer Näherungsformel und theoretische Betrachtungen.

Beim Befühlen der Federfahnen gleich großer und einander entsprechender Federn verschiedener Vogelarten ist meistens in gleichen Fahnenbereichen eine unterschiedliche Festigkeit festzustellen. Auch innerhalb einer Feder kann diese Beobachtung gemacht werden: die Festigkeit der Fahne ist am Federfahnenrand geringer als in Schaftnähe und sinkt gegenüber dem mittleren Fahnenbereich auch proximal und distal ab. Bei den Schwungfedern scheint darüber hinaus die Außenfahne fester zu sein als die Innenfahne.

Bereits TIEDEMANN (1810) stellt eine unterschiedliche Stärke der Rami an Innen- und Außenfahne fest, und MASCHA (1904) schreibt: "Die (Rami) sekundären Kiele sind nicht bei allen Schwungfedern gleich gebaut. Es ist eine regelmäßige Größen- und Gestaltsänderung in den verschiedenen Federn eines Flügels einerseits, und in den verschiedenen Teilen jeder einzelnen Feder andererseits festzustellen. ... Es macht sich am ganzen Flügel eine Versteifung der sekundären Kiele von innen nach außen bemerkbar, wobei auch die äußere Federfahne bei den Handschwingen der inneren gegenüber immer schmaler, zugleich auch steifer und fester" wird.

SICK ergänzt, daß "allein proximal und distal an der Feder die einander entsprechenden Rami gleich stark sind".

Man sieht, daß die Worte "fest", "weich" und "steif" von den einzelnen Autoren sehr häufig gebraucht werden. Keiner gibt jedoch ein Maß, das als Meßgrundlage der Festigkeit dienen könnte, an.

MASCHA nennt lediglich einige Maßzahlen für die Höhe der sekundären Kiele.

Um genauere Aussagen über die Festigkeit machen zu können, soll im folgenden eine Näherungsformel entwickelt werden.

Für die Vogelfeder kommt bei dynamischer Flugbeanspruchung (infolge der Druck- und Sogverhältnisse an Federunter- und Federoberseite) in erster Linie die Biegefestigkeit in Frage.

Biegung tritt dann auf, wenn etwa ein Balken mit rechteckigem Querschnitt (b, h) an einem Ende durch eine Einspannung festgehalten wird, während am anderen Ende oder im Abstand l von der Einspannstelle an einer beliebigen Stelle eine senkrecht zur Balkenachse wirkende Kraft P angreift.

Ein Maß für die Biegefestigkeit stellt die Senkung d des Stabes dar, für deren Größe die Elastizität des Materials (im Elastizitätsmodul E festgelegt) maßgebend ist. Wie aus Physik-Lehrbüchern ersichtlich ist, gilt:

$$d = \frac{4 \cdot P}{E} \cdot \frac{l^3}{b \cdot h^3}$$

Die Gleichung besagt, daß bei gleichem P , l , E die Durchbiegung d von einem Querschnittsfaktor ($b \cdot h^3$) abhängt, der mit wachsender Größe die Durchbiegung verringert, also die Biegefestigkeit erhöht.

Da die geometrischen Abmessungen des Balkenquerschnitts b und h die Biegefestigkeit mitbestimmen, können sie als Maß für die Biegefestigkeit eingeführt werden. Wir benutzen jedoch nicht den Querschnittsfaktor $b \cdot h^3$, sondern $b \cdot h^2$, der mit dem Widerstandsmoment $W = b \cdot h^2/6$ eng zusammenhängt und in die Gleichung für die Biegefestigkeit mit eingeht. Diese lautet:

Moment der äußeren Kräfte = Biegespannung · Widerstandsmoment

Da bei senkrechter Fahrenbelastung die am Schaft einseitig eingespannten Federäste eine Durchbiegung in Richtung h erfahren, wird als Maß für die Festigkeit der Fahrenfläche die Flächen-dichte D' der Querschnittsfaktoren $b \cdot h^2$ der Äste eingeführt.

Wir setzen: $M = D' \cdot b \cdot h^2$ (10)

Kritik der Näherungsformel:

- Es wird von rechteckigen Querschnitten ausgegangen, die in der Natur selten anzutreffen sind. Auch für nicht -rechteckige Querschnitte läßt sich der in die Biegeggleichung eingehende Querschnittsfaktor näherungsweise bestimmen (SCHREYER-RAMM-WAGNER, Praktische Baustatik, 1961). Wie die Durchrechnung eines willkürlich gewählten Beispieles (Abb. 42) zeigt, kann auch bei komplizierteren Querschnitten idealisiert von einer Rechteckform ausgegangen werden, ohne das Untersuchungsbild entscheidend zu verfälschen.
- Die Biegespannung eines Federastes aus Horn hängt, da kein massives Hornmaterial vorliegt, sicher auch vom inneren Aufbau der einzelnen Äste ab. Dieser innere Aufbau der Äste ist nach HERTEL eine Sandwich-Konstruktion. Die Äste bestehen aus zwei dünnwandigen Deckhäuten und einem Kern aus Blasen, die

ihrerseits noch dünnere Wände aufweisen. Damit wird erreicht, daß die Astwände bei Belastung u.a. gegen Beulen und Falten geschützt und somit biegesteif werden. Es müssen demnach auch Materialfaktoren mitberücksichtigt werden. Bei gleichem Querschnittsfaktor zweier Äste dürfte jedoch deren Festigkeit trotz des nicht massiven inneren Aufbaus nur geringfügig verschieden sein.

- Die Vernachlässigung der Radienwirkung für die Biegefestigkeit ist sicher ein schwerwiegender Einwand gegen die Näherungsformel, zumal die Biegefestigkeit der Äste in der Fahnenebene nach distal oder proximal -also in Richtung der Astbreite- auf jeden Fall von der Radienausbildung mit abhängt, deren Verhakungsmechanismus ja auch bei stärkerer Beanspruchung der Feder den Zusammenhalt der Äste garantiert. Außerdem darf nicht vergessen werden, daß bei punktueller Biegebelastung der Fahne, wie sie immer auftreten kann, ein Ausgleich der Spannung durch die Radien der miteinander verhakten, benachbarten Äste erfolgt. Trotzdem meine ich, daß die morphologisch viel bedeutsameren Äste einer Kraftwirkung bestimmt stärkeren Widerstand entgegensetzen als die schwächlichen Radien.

Unter Berücksichtigung fehlerhafter Faktoren ist meines Erachtens der Aussagewert der Näherungsformel so groß, daß sie sinnvoll zur Untersuchung der Festigkeit der Federfahnen angewandt werden kann. Eine allgemein gültige Formel zu finden, die allen Belangen gerecht wird und eine definitive Aussage über die Festigkeit eines beliebigen Fahnenbereiches erlaubt, ist nahezu unmöglich, wenn man an den Formenreichtum der Ast- und Radienausbildung denkt und dabei noch berücksichtigt, daß auch von der Basis bis zur Spitze eines Astes kontinuierlich Querschnittsänderungen auftreten.

Wenn wir dagegen die Formel $M = D \cdot b \cdot h^2$ lediglich als ein angenähertes Maß für die Festigkeit auffassen, dann erlaubt ihre Anwendung über die bloße Untersuchung der Festigkeit einer Feder hinaus auch Vergleiche mit anderen Federn.

Theoretische Betrachtungen:

$$M = D' \cdot b \cdot h^2$$

Es ist ersichtlich, daß die Festigkeit einer Federfahne bei Konstanz zweier Größen mit der 3. Größe zunimmt. Zweifellos muß dabei der Asthöhe h die größte Bedeutung für die Biegefestigkeit eingeräumt werden, da das Quadrat dieser Größe in die Formel eingeht und die Höhe h außerdem -wie die Praxis zeigt- die Breite eines Astes bei weitem übertrifft.

Die Astflächendichte D' , die ja maßzahlmäßig dem reziproken Wert der Summe aus Astbreite b und Astabstand d entspricht, hat nur indirekt Einfluß auf die Festigkeit, wie leicht einzusehen ist, wenn wir in die Formel $M = D' \cdot b \cdot h^2$ für die Flächendichte $D' = 1/(b+d)$ einsetzen und umformen:

$$M = \frac{b \cdot h^2}{b + d}$$

$$M = \frac{h^2}{1 + d/b} \quad (11)$$

Die Festigkeit hängt dann nur von der Größe des Quotienten $\frac{h^2}{1+d/b}$, also vom Verhältnis Zähler/Nenner ab.

Bei konstantem Zähler lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

- a) Die Festigkeit nimmt zu, wenn der Nenner $(1 + d/b)$ kleiner wird.

Da die Veränderlichkeit der Größe des Nenners nur vom Verhältnis d/b abhängt, muß auch d/b kleiner werden. Das bedeutet große Astbreite bei kleinem Astabstand.

Die Flächendichte D' ergibt sich zu $1/(b_{\max} + d_{\min})$

- b) Die Festigkeit bleibt gleich, wenn der Nenner konstant ist, also auch der d/b Wert. Dies ist auch dann der Fall, wenn d und b sich gleichförmig ändern. Sie können dabei jeweils größer oder kleiner werden.

Im ersten Fall führt das zu kleinerer Flächendichte der Äste auf Grund des großen Nenners: $D' = 1/(d_{\max} + b_{\max})$;

im zweiten Fall zu einer großen Flächendichte: $D' = 1/(d_{\min} + b_{\min})$.

Bei gleichem h , aber sehr unterschiedlichen Flächendichten sind theoretisch durchaus gleiche Festigkeiten zu erwarten.

- c) Die Festigkeit nimmt mit steigender Größe des Nenners $(1+d/b)$, also mit wachsenden d/b Werten ab.

Dies bedeutet große Astabstände und kleine Astbreiten.

Man erkennt, daß dann der Wert der Flächendichte $D' = 1/(d_{\max} + b_{\min})$ dem Wert von D' im Fall a) $D' = 1/(d_{\min} + b_{\max})$ entsprechen kann, was letztlich bedeutet, daß bei gleicher Flächendichte sehr unterschiedliche Festigkeiten möglich sind.

Die Größe von D' allein kann keinesfalls als Maß für die Festigkeit dienen.

Um definitive Aussagen über die Festigkeit machen zu können, muß man die drei Größen h , d und b zusammen betrachten. Der Wert einer Größe genügt nicht als Hinweis für eine bestimmte Fahnenfestigkeit.

Wie bereits erwähnt, hat jedoch die Höhe h unter den erwähnten Faktoren eine dominierende Rolle für die Festigkeit, so daß in erster Linie für die Festigkeit die Größe des Zählers in der Formel $M = h^2/(1+d/b)$ verantwortlich ist.

In den bisher genannten Fällen wird von konstanter Schafthöhe ausgegangen und eine davon unabhängige Veränderung von Astbreite und Astabstand angenommen. Die Tatsache, daß in vielen Fällen die Größe der Asthöhe in morphologischer Beziehung zur Ausbildung der Astbreite steht, macht eine zusätzliche Analyse der Festigkeitsformel notwendig.

Es zeigt sich, daß bei großer Asthöhe meistens auch eine starke Astbreite festzustellen ist, wobei auch die Basallamellen der Rinden entsprechend ausgebildet sind und zu großen Astabständen führen.

Die Festigkeit einer Fahne wird also bei gleichen d/b Werten mit der Größe von b zunehmen, bzw. erst recht, wenn es durch eine Engerlagerung der Äste zu schwindenden Astabständen kommt. Die Festigkeit steigt also mit der Größe von b bei gleichen d/b Werten an und erreicht maximale Werte, wenn neben großen Astbreiten auch große Asthöhen auftreten.

Umgekehrt herrschen geringe Festigkeiten vor, wenn die Äste bei kleiner Höhe sehr dünn sind und weitauseinander stehen.

Die Grenzwerte für extreme Festigkeiten sind folgendermaßen festzulegen:

$$M_{\max} = h_{\max}^2 / (1 + d_{\min} / b_{\max}) \quad M_{\min} = h_{\min}^2 / (1 + d_{\max} / b_{\min})$$

Diese Ausführungen beziehen sich auf die Fahnenfestigkeit einer Feder im Ruhezustand. Für die Untersuchung der Festigkeit bei Flugbeanspruchung berücksichtigen wir zunächst die Außenfahnenbereiche der Schwungfedern, die direkt vom Luftstrom getroffen werden.

Der Anblaswind bewirkt in Verbindung mit den Druckverhältnissen in diesen Fahnenbereichen ein Engerrücken der Rami an den Schaft, also eine Verkleinerung von α .

Setzen wir in die Formel $M = D' \cdot b \cdot h^2$ für $D' = D / \sin \alpha$, so zeigt sich, daß nach $M = D \cdot b \cdot h^2 / \sin \alpha$

durch die Abnahme von α der Nenner kleiner, die Festigkeit also größer wird. Die besondere Winkelstellung der Außenfahnenäste führt also beim Flug zu einer Erhöhung der Biegefestigkeit der Federfahne.

Zum gleichen Ergebnis gelangt man, wenn man in der Formel $M = h^2 / (1 + d/b)$ die Veränderlichkeit von d bei Flugbeanspruchung berücksichtigt. Das Engerlagern der Rami verringert ihren Abstand, und somit wird auch der Nenner $(1 + d/b)$ kleiner.

Für die Innen- (und Außenfahnen), die im Dienst der Fahnenreibung stehen, gilt allgemein, daß ihre Festigkeiten durch die genannten Kraftwirkungen, die ein Auseinanderzerren des Astgefüges hervorrufen, abnehmen.

Der Nenner $(1 + d/b)$ wächst mit dem Astabstand d und führt zu einer geringeren Festigkeit $M = h^2 / (1 + d_{\max} / b)$.

Da aber die Äste bei großen Schaftastwinkeln weniger stark der auseinanderziehenden Kraftkomponente ausgesetzt sind als bei kleinen Winkeln, nimmt ihre Festigkeit auch in geringerem Maße ab.

Optimale Festigkeitsverhältnisse liegen bei den Innenfahnen vor, deren Astringung parallel zu den Kraftwirkungen verläuft. Ihre Astabstände bleiben auch bei Flugbeanspruchung konstant und somit auch ihre Festigkeiten. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die günstigen Winkelverhältnisse bei den Eulen verwiesen.

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich nur auf den proximalen Fahnenbereich, der auch beim Flug von Nachbarfedern überdeckt wird und in erster Linie den Reibungskräften ausgesetzt ist. Unberücksichtigt bleiben dabei die Kräfte, die von willkürlichen und reflexiven Spannungsverhältnissen des Flügels beim Flug abhängen, wobei auch das Torsionsvermögen der einzelnen Feder im Flügelganzen in und mit ihrem elastischen Lager in der bindegewebigen Haut eine Rolle spielt.

Wie bereits AHLBORN feststellt, weisen die vorderen Schwingen vieler Vogelarten eine auffallende Verschmälерung von Innen- und Außenfahne auf, die um so weiter von der Spitze zur Basis reicht, je näher die Schwinge der Vorderkante des Flügels benachbart ist.

Wie Beobachtungen an fliegenden Großvögeln wie Adlern zeigen, wird der Flügel den besonderen aerodynamischen Verhältnissen durch eine entsprechende Stellung der schmalfahnnigen Handschwingen angepaßt, wobei diese im Federverband wie Einzelflügel wirken.

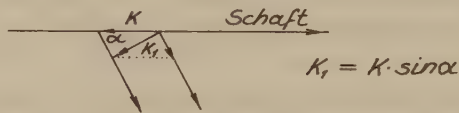
HERTEL schreibt dieser sogenannten Kaskaden-Anordnung der Handschwingen nicht nur günstige Flugeigenschaften für die Steil-Landung zu, er sieht in einem mehr oder weniger starken Spreizen der Handschwingen auch eine Anpassung an Flugzustände ohne Flügelschlag, also beim Segeln, beim Sichtragenlassen durch Aufwinde oder beim Gleiten.

AHLBORN erkennt in diesem Zusammenhang, daß unter Einwirkung des Luftwiderstands (besser: der Druck- und Sogkräfte) eine vordere Handschwinge eine Krümmung erfährt, die nach oben und nach vorne gerichtet ist.

Im Versuch läßt sich dieser natürliche Spannungszustand der Feder in etwa dadurch erreichen, daß man eine Handschwinge am proximalen Schaftende festhält und die Federspitze in der angegebenen Weise nach oben und vorne durchbiegt. Man beobachtet dann als Folge der Durchbiegung ein Auseinanderweichen der Innenfahnenäste und ein Zusammenrücken der Außenfahnenäste. Die Äste gehorchen somit den durch die Schaftkrümmung hervorgerufenen besonderen Kräften:

Die Biegung im angegebenen Sinne führt zu Druckkräften entlang der Außenfahnnenseite des Kiels, zu Zugkräften entlang der Innenfahnnenseite. Die Druckkräfte fördern das Zusammenrücken der Außenfahnnäste und sind damit im gleichen Sinne tätig wie die Strömungskräfte. Beide dienen der Verfestigung der Außenfahne.

Die Zugkräfte wirken entlang der Seitenwand des Kiels, an der die Innenfahnnäste inserieren, und übertragen sich somit auf deren Ansatzstellen. Sie ziehen die Äste auseinander und bedingen außerdem eine Vergrößerung der Schaftastwinkel.



Aus dem Kräfteparallelogramm folgt, daß die Kraft K_1 , die für das Auseinanderweichen der Äste verantwortlich ist, mit zunehmendem Astwinkel größer wird.

Der Luftstrom, der mehr oder weniger senkrecht zur Schafttrichtung angreift, erfordert dagegen große Schaftastwinkel, um die das Astgefüge auseinanderzerrenden Kräfte klein zu halten. Beide Prinzipien machen daher eine Winkelstellung der Innenfahnnäste notwendig, die den gegensätzlichen Bedürfnissen gerecht wird.

B. Anwendung der Formel auf die Schwungfedern

Praktische Untersuchungen

Wir betrachten als willkürlich gewähltes Beispiel einer Schwungfeder die 3. Handschwinge einer Wildgans. Da sie in vielen Dingen allgemein geltende Schwungfedermerkmale widerspiegelt, wollen wir uns etwas ausführlicher mit dieser Feder befassen. Die Meßdaten sind in den Tabellen Nr. 43 b, 44 b, c niedergelegt und in den Abb. 43, 44 graphisch ausgewertet. Zum Verständnis der Darstellung und der Meßwerte sei kurz auf die Meßmethode eingegangen:

- a) Der Federschaft wird von proximal nach distal in gleich große Abschnitte von ca. 1 cm Länge unterteilt. In der Tabelle sind die Markierungspunkte 0, 1, 2, 3 ... in der senkrechten Spalte angegeben, in der graphischen Darstellung entsprechen sie den Punkten der x-Achse.
- b) In jedem Schaftabschnitt werden die dort inserierenden Äste der Innenfahne gesondert von denen der Außenfahne bezüglich D' , b und h untersucht.
- c) Die Bestimmung der genannten Größen erfolgt pro Ast von proximal nach distal, und die jeweiligen Markierungspunkte 0, 1, 2, 3 ... (im Abstand von 5 mm) sind pro Schaftpunkt in die waagrechten Tabellenspalten eingetragen.
- d) Zur Bestimmung von b und h werden die Äste nach Bestimmung der Flächendichte dem Fahnenverband entnommen und einzeln untersucht. Eine Zerstückelung des Materials ist dabei nicht zu umgehen.
- e) Die Maßzahlen für die Festigkeit werden nach der Formel $M = b \cdot h^2 \cdot D'$ berechnet. Die Bestimmung von b , h und D' erfolgt aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit durch Angabe der Zahl der bei 80-facher Vergrößerung mit dem Meßokular erhaltenen Teilstriche.
Das Ergebnis bleibt unverfälscht, da als Maß für die Festigkeit nur die Größe einer Zahl dient und bei unterschiedlichen Festigkeiten lediglich das Zahlenverhältnis entscheidend ist.

Beispiel:

In Position 9 der Innenfahne hat ein Ast in Position 1 folgende Werte:

$$\begin{array}{ll} D' = 29T & D' = 80/29 \text{ mm}^{-1} \\ b = 4T & b = 4/80 \text{ mm} \\ h = 112T & h = 112/80 \text{ mm} \end{array}$$

$$M = D' \cdot b \cdot h^2 = \frac{80 \cdot 4 \cdot 112^2}{29 \cdot 80 \cdot 80}$$

$$M = \frac{4 \cdot 112^2}{29} \cdot \frac{1}{6400}$$

Bei der Angabe der Größen in mm erhält man den Festigkeitswert 0,270; nimmt man nur die Teilstrichzahlen, beträgt der Wert 1730, also das 6400-fache von 0,270.

- f) Die Ordinate der graphischen Darstellungen gibt die Maßzahlen der Fahnenfestigkeit wieder. Die Einzelkurven, die durch geradliniges Verbinden der einzelnen Festigkeitswerte erhalten werden, sind numeriert. Die Zahlen 0,1,2,3, ... entsprechen den Markierungspunkten eines Astes von proximal nach distal. Der Kurvenverlauf zeigt die verschiedenen Festigkeitswerte der Federfahne bei einer bestimmten Asthöhe. Die Kurve 2 z.B. umfaßt die Werte aller im Markierungspunkt 2 untersuchten Äste.

Entlang einer zur y-Achse parallelen, durch einen beliebigen Markierungspunkt der x-Achse gelegten Linie lassen sich an ihren Schnittpunkten mit den Einzelkurven die jeweiligen Festigkeitswerte der Federfahne in Astrichtung ablesen.

- g) Zum Schluß noch eine Bemerkung zu den Meßfehlern:

Die exakte Bestimmung von b ist schwieriger als die von D' und h . Für die näherungsweise Ermittlung der Festigkeit fallen Meßfehler nicht so sehr ins Gewicht, wie man sich beim Durchrechnen von Zahlenbeispielen leicht überzeugen kann.

Es läßt sich in jedem Fall zu dem gemessenen h -Wert eine Breite b so festsetzen, daß das tatsächliche Widerstandsmoment erhalten wird. Diese Breite b ist theoretisch kleiner als die maximale Astbreite und größer als die minimale.

Je besser der reale Querschnitt der Rechteckform entspricht, desto einfacher gestaltet sich die Bestimmung von b . In den meisten Fällen läßt sich gedanklich ein Rechteck so in den Naturquerschnitt legen, daß in guter Näherung die Rechteckbreite als Astbreite bezeichnet werden kann.

Eine besondere morphologische Bildung vieler Äste erschwert jedoch die exakte Bestimmung von b : die ventrale Astlamelle. Sie beginnt an der Astbasis und erstreckt sich über einen begrenzten Teil der Astlänge, wobei die Außenfahne eine noch schmalere Lamellenzone aufweist als die Innenfahne.

Für die näherungsweise Ermittlung der Festigkeitswerte fallen jedoch ungenaue b -Werte kaum ins Gewicht, wie man sich durch Rechnung überzeugen kann: der aus zwei Festigkeitswerten des gleichen Fahnenbereichs gebildete Quotient liegt in der Größenordnung von 1, wenn zwei unterschiedliche b -Werte zur Berechnung benutzt werden.

Beispiel:

$$M_1 = b_1 \cdot h^2 \cdot D' = (4 \cdot 100^2) / 20 = 2000$$

$$M_2 = b_2 \cdot h^2 \cdot D' = (3 \cdot 100^2) / 20 = 1500$$

$$M_1 / M_2 = 4/3 = 1,3$$

Das Verhältnis zweier unterschiedlicher Festigkeitswerte einer Federfahne kann jedoch auf Grund sehr unterschiedlicher h -Werte in der Größenordnung von 10^3 liegen. Damit bleibt also eine deutliche Differenz zwischen den unterschiedlichen Festigkeitswerten auch bei fehlerhafter b -Messung erhalten.

Wenn wir zunächst die Außenfahne der Schwungfeder betrachten, so zeigt die Wertetabelle innerhalb der verschiedenen Fahnenbereiche in erster Linie eine Änderung von Asthöhe und Flächendichte an. Die Astbreite bleibt nahezu konstant. Von der Astbasis zur Spitze wird die Höhe kontinuierlich kleiner, am Astende beträgt sie teilweise nur noch $1/70$ der Höhe am Astanfang. Die Flächendichte der Äste nimmt zum Federrand zu, was letztlich - bei gleichem b - einer Engerlagerung der Rami gleichkommt.

Die graphische Darstellung zeigt die Abnahme der Biegefestigkeit der Federfahne mit zunehmendem Abstand des Fahnenbereichs vom Schaft. Man erkennt außerdem, daß die Festigkeit der Außenfahnenäste über die gesamte Schaftlänge nicht einheitlich ist, sondern einem Maximum in Schaftmitte zustrebt. Die Festigkeit nimmt zur Schaftbasis und zur Schaftspitze von der Schaftmitte aus ab.

In unmittelbarer Schaftnähe, im Abstand 5 mm und 10 mm von der Astbasis (Positionen 0, 1 und 2), werden die genannten Tendenzen sehr deutlich. Die Kurven 3 und 4 beweisen das rasche Abnehmen der Biegefestigkeit zum Federrand zu.

Betrachtet man die Tabellenwerte der Innenfahne, so fällt auf, daß die Festigkeitswerte entlang eines Astes von basal nach distal gleichen Veränderungen unterliegen wie die der Außenfahnenäste. Auch das Verhalten der Festigkeiten in den Positionen 0, 1, 2 ... vom Schaftanfang bis zur Schaftspitze gleicht dem der Außenfahne.

Die Äste streben einem Festigkeitsmaximum zu, das in seiner Lage fast mit dem der Außenfahne übereinstimmt und größtmäßig nur geringfügig unter dem Wert der Außenfahne liegt. In den Astpositionen 2, 3 und 4 des mittleren Fahnenbereiches treten bei den Innenfahnenästen höhere Werte als bei den Außenfahnenästen auf, was als Folge ihrer Überlänge gedeutet werden kann: Die Äste der Innenfahne nehmen langsamer an Höhe ab als die Außenfahnenäste.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß die größten Festigkeitswerte der Federfahne immer in Schaftnähe auftreten, daß die Festigkeit zum Federrand hin abnimmt und daß Außen- und Innenfahne etwa in Schaftmitte jeweils ein Festigkeitsmaximum aufweisen, das zur Federbasis und zur Federspitze zu abnimmt.

C. Der flächenverändernde Quotient

Vergleicht man abschließend nochmals die Tabellenwerte von Innen- und Außenfahne miteinander, so zeigt sich eine auffällige Divergenz im Verhalten der Flächendichten vom Schaft zum Federrand bei Innen- und Außenfahne: Während die Af-Flächendichten zum Federrand zunehmen oder gleichbleiben, nehmen die D'-Werte der Innenfahne ab. Da die Astbreiten von der Astbasis bis zur Astspitze relativ unverändert bleiben, bedeutet die Verringerung der Flächendichte nach $D' = 1/(b+d)$ und $b = (1/D' - d)$ eine Zunahme von d, also ein Auseinanderweichen der Äste zum Federrand hin, was einer Fahnenflächenvergrößerung gleichkommt.

Optisch macht sich diese Flächenvergrößerung durch eine auffällige Wellung bemerkbar, die bereits von AHLBORN beschrieben und gedeutet wurde: "Der verschmälerte Teil des hinteren Federbartes zeigt in vielen Fällen eine leichte, gegen den Rand zunehmende

Wellung, welche sich durch Geradestrecken und Durchbiegen des Schaftes nach oben und vorn, sowie durch Emporbiegen des hinteren Federrandes ausgleichen läßt... wie am Vorderbart die Fiedern dichter zusammengeschoben, die Fläche also verkleinert wird, so findet am Hinterbart eine Flächenvergrößerung statt; aber diese wird nicht so sehr durch Auseinanderzerren der Fiedern, als vielmehr durch Ausgleichen und Glätten der am hinteren Federrande deutlich zu sehenden Wellung des Federbartes erzielt." Obwohl die funktionelle Bedeutung der Wellung erkannt wird, fehlt in der Literatur eine morphologische Untersuchung dieser Struktur.

Die mathematische Bedingung für die Fahnenflächenvergrößerung läßt sich aus der Astflächendichte ableiten.

Nach Definition gilt:

$$D' = Z/F = \text{Anzahl der Äste/pro Fahnenflächeneinheit} = 1/(b+d)$$

$(b+d)$ stellt die Maßzahl für die Fläche (in mm^2) dar, die zu einem Ast gehört.

Setzen wir $(b+d) = \Delta F$, so erhalten wir: $D' = 1/\Delta F$, bzw. $\Delta F = 1/D'$

Wenn von der Basis bis zur Spitze eines Astes die Flächendichte abnimmt, so nimmt umgekehrt die Fläche zwischen zwei Ästen zu; die Flächendichten verhalten sich nach obiger Formel umgekehrt zueinander wie die zugehörigen Fahnenflächen.

Setzen wir für das Abnehmen der Flächendichten entlang eines Astes $D'_0 > D'_1 > D'_2 \dots > D'_n$, so folgt daraus:

$$D'_0/D'_1 = \Delta F'_1/\Delta F'_0 > 1, D'_0/D'_2 = \Delta F'_2/\Delta F'_0 > 1, D'_0/D'_n = \Delta F'_n/\Delta F'_0 > 1$$

Das Verhältnis D'_0/D'_n gibt das Maß der Flächenvergrößerung wieder und sei deshalb als "flächenverändernder Quotient Q_f " bezeichnet.

Für die Schwungfederinnenfahne gilt dann allgemein: $Q_f > 1$,
für die Schwungfederaußenfahne $Q_f < 1$.

Der Grad der Wellung der Innenfahne hängt sicherlich von der Größe Q_f ab und nimmt mit wachsenden Q_f -Werten zu.

Die Tatsache, daß infolge der Fahnenvergrößerung bei vielen Schwungfederinnenfahnen Wellungen auftreten, hängt sicher auch mit dem Bau der Äste und deren Anordnung am Schaft zusammen. Um die Wellung trotz Fahnenvergrößerung zu vermeiden, stünden den Ästen zwei Bewegungsrichtungen in Fahnenebene zur Verfügung: die Bewegung zur Federspitze und die Bewegung zur Federbasis. Beide Bewegungen sind jedoch durch die gegebenen morphologischen Verhältnisse stark eingeschränkt: einer Bewegung der Äste nach distal gebietet die Schaftschränke Einhalt, und einer Bewegung nach proximal widersetzt sich die Gesamtheit der nach distal ziehenden Äste. Dieser Widerstand wächst, je weiter die Flächenvergrößerung distal auftritt. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, daß die Flächenvergrößerung vorwiegend in mittleren und distalen Innenfahnenabschnitten auftritt, während sie zur Federbasis hin, wie die Q_F -Werte zeigen, schwächer entwickelt ist.

Die graphischen Darstellungen (Abb. 45) zeigen an einigen Federausschnitten der 3. HS der Graugans das unterschiedliche Verhalten der Q_F -Werte von Außen- und Innenfahne zum Federrand hin. Die an der Feder zu beobachtende Wellung stimmt hinsichtlich des zum Federrand anwachsenden Wellungsgrades mit den zunehmenden Q_F -Werten überein.

Die Q_F -Werte in Schaft-Position 16 entlang der Innenfahnenäste lauten von basal nach distal:

$$\begin{aligned} Q_F &= D'_0/D'_1 = 28/27 = 1,04 \\ &= D'_0/D'_2 = 32/27 = 1,19 \\ &= D'_0/D'_3 = 32/27 = 1,19 \\ &= D'_0/D'_4 = 34/27 = 1,26 \\ &= D'_0/D'_5 = 37/27 = 1,37 \\ &= D'_0/D'_6 = 38/27 = 1,41 \end{aligned}$$

Man erkennt, daß die Fahnenfläche zum Federrand zu bis auf das 1,4-fache ihres Wertes in Schaftnähe ansteigt.

Die entsprechenden Q_F -Werte der Außenfahne in Schaftposition 16 zeigen, daß die Außenfahnenfläche am Federrand auf $2/3$ ihres Wertes in Schaftnähe abgesunken ist:

$$\begin{aligned} Q_f &= D'_0/D'_1 = 27/28 = 0,96 \\ &= D'_0/D'_2 = 27/28 = 0,96 \\ &= D'_0/D'_3 = 22/28 = 0,78 \\ &= D'_0/D'_4 = 18/28 = 0,64 \end{aligned}$$

D. Vergleich der Festigkeiten verschiedener Vogelfedern

Da die Veränderlichkeit der Flächendichte $D' = 1/(b+d)$ und somit der Fahnenfläche in erster Linie durch die Veränderlichkeit des Abstandes d ausgelöst wird, also durch entsprechende Winkelstellung und Basallamellenlängen der Radien, wird auf die Fahnenwellung noch einmal im letzten Kapitel bei der Besprechung der Radien eingegangen.

Das Verhalten der Fahnenfestigkeit in den verschiedenen Federn des Vogelkleides soll am Beispiel eines Sperbers gezeigt werden. Zur Untersuchung gelangen die Schwungfedern des Flügels, des Stoßes und andere Deckfedern.

Die äußerste Handschwinge (Abb. 46)

Die Federfahne ist 14 cm lang und besitzt in Schaft-Position 3 - 4 (= Ende des 1. Fahndrittels) ein Festigkeitsmaximum der A_f von 1 481, das mit der Lage des Innenfahnenmaximums übereinstimmt, dieses jedoch wertmäßig um ca. das Doppelte übertrifft. Das geringere Festigkeitsmaximum der Innenfahne kommt durch kleinere h - und b -Werte zustande. Interessant ist, daß die schmale Außenfahne fast ebenso lange Äste wie die Innenfahne aufweist.

2. Handschwinge (Abb. 47)

Ihre 14 cm lange Außenfahne weist in Pos. 3 eine Verengung auf, an der in Schaftnähe ein Festigkeitsmaximum von 1 000 vorliegt; das Festigkeitsmaximum der Innenfahne liegt bei Pos. 6 und ist ca. halb so groß wie das der Außenfahne.

Die b-Werte der Außenfahne betragen in Schaftnähe etwa $1/20$ mm und sind damit doppelt so groß wie die der Innenfahne mit $1/40$ mm.

3. Handschwinge (Abb. 48)

Die Außenfahne dieser Feder hat bei Pos. 5 eine Engstelle mit einem Festigkeitsmaximum von 867 in Schaftnähe. In Pos. 1 der 7 - 18 mm langen Äste treten zwei kleinere Maxima auf. Das erste in Schaftposition 4, das zweite in Pos. 6. Das Vorhandensein dieser Maxima hängt mit der variierenden Astlänge zusammen, die an der Fahnenverengung nur noch 7 mm beträgt und daher sehr rasch von basal nach distal an Festigkeit abnimmt.

Die etwa 17 cm lange Innenfahne besitzt in Schaftposition 7 ein Festigkeitsmaximum von 385, das zum Federrand hin entlang der 25 mm langen Äste kontinuierlich abnimmt. Das Verhältnis der Festigkeitsmaxima von Außen- und Innenfahne beträgt ca. $11/5$.

4. Handschwinge (Abb. 49)

In der Außenfahne machen sich ähnliche Tendenzen bemerkbar wie bei der 3. HS; das Festigkeitsmaximum liegt an der Fahnenverengung (Pos. 5) und in Astposition 1 treten zwei weitere Hochwerte auf, die wieder durch die sehr unterschiedlichen Astlängen begründet sind. Die Astlängen der etwa 17 cm langen Fahne betragen in Schaftmitte 20 mm.

Gegenüber der Innenfahne hat die Außenfahne ein etwa 3mal so großes Festigkeitsmaximum und übertrifft damit noch die Höchstwerte der Außenfahnen von HS 2 und HS 3.

5. Handschwinge (Abb. 50)

Die Federfahne ist 15 cm lang und besitzt an der Verengung der Außenfahne ein Maximum von 562, das etwa doppelt so groß ist wie das auf gleicher Schafthöhe liegende Innenfahnenfestigkeitsmaximum, aber nur noch ein Drittel des Wertes der äußersten Handschwinge ausmacht.

6. Handschwinge (Tab. 51)

Die Festigkeitsmaxima der 12 cm langen Federfahne gehen weiter sprunghaft zurück, liegen für Innen- und Außenfahne bei Schaft-

position 5 und sind annähernd gleich, obwohl die Innenfahnenäste mit 35 mm Länge mehr als doppelt so groß sind wie die Außenfahnenäste.

7. Handschwinge (Abb. 52)

Die 12 cm lange Federfahne ist bezüglich ihrer Festigkeitswerte mit der 6. HS vergleichbar. Auch die Astlängen beider Federn stimmen überein.

10. Handschwinge (Abb. 53)

Die bei Schaftposition 5 liegenden Festigkeitsmaxima von Innen- und Außenfahne sind ungefähr gleich groß, betragen jedoch nur $1/15$ des Festigkeitswertes der Af der 1. HS.

1. Armschwinge (Tab. 54 b/c)

Die beiden Festigkeitsmaxima sind etwa gleich groß, nehmen aber weiterhin ab im Vergleich zu den Werten der Handschwingen. Die Astlängen in Federmittle betragen bei den Af-Ästen 25 mm, bei den If-Ästen 35 mm.

5. und 7. Armschwinge (Tab. 55 b/c)

Die Federn sind etwa 9 cm lang. Ihre Außenfahnenäste übertreffen mit 31 mm Länge die Innenfahnenäste um 10 mm. Innen- und Außenfahne haben in Pos. 3 ein Festigkeitsmaximum von ca. 36. Das bedeutet, daß gegenüber der 1. HS die Festigkeit auf den 40. Teil abgesunken ist. Trotz großer Astlängen geht die Festigkeit entlang eines Astes so stark zurück, daß sie in Pos. 1 nur noch $1/1000$ des Wertes der äußersten HS beträgt.

Innerhalb der Schwungfedern des Flügels machen sich von der äußersten HS bis zur innersten AS folgende Tendenzen bemerkbar:

- die Festigkeit der Federfahne nimmt ab.
- die Festigkeit der Außenfahne ist bei den äußeren HS größer als bei der Innenfahne; der Unterschied wird geringer, je weiter die HS von der Flügelvorderkante entfernt liegt. Bei den hinteren

Handschwingen und bei den Armschwingen sind in Schaftnähe keine starken Festigkeitsunterschiede mehr feststellbar.

Die bereits von MASCHA getroffene Feststellung, daß sich am Vogelflügel eine Versteifung der Äste von innen nach außen bemerkbar macht, wobei bei den Handschwingen auch die Außenfahne gegenüber der Innenfahne steifer und fester wird, wird im großen und ganzen durch die Federn des Sperberflügels bestätigt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß eine kontinuierliche Abnahme der Festigkeit der Vogelfedern von der 1. HS bis zur letzten AS zumindest bei den vorderen Handschwingen nicht bei allen Vogelarten festzustellen ist.

Eine Ausnahme stellt z.B. auch die 4. HS des Sperbers dar, die in der Außenfahne höhere Festigkeitswerte aufweist als die 2. und 3. HS.

Die weitere Analyse der Werte zeigt, daß die Abnahme der Fahnenfestigkeit von der Flügelaußenkante bis zur letzten Armschwinge bedingt ist durch

die Abnahme der Asthöhe h ,

die Abnahme der Astbreite b

und durch die Abnahme der Flächendichte D' .

Letztere ist zwar Schwankungen unterworfen, gegenüber den äußeren Handschwingen haben aber die inneren Schwungfedern geringere D' -Werte. Da die Festigkeit aus dem Produkt $M = b \cdot h^2 \cdot D'$ berechnet wird, folgt zwangsläufig ein schnelles Abnehmen von M bei gleichzeitiger Verkleinerung aller drei Faktoren b , h und D' .

Mit der Formel $M = h^2 / (1 + d/b)$ läßt sich auch die Tatsache erklären, daß bei den Armschwingen trotz unterschiedlicher h -Werte gleiche M -Werte in Innen- und Außenfahne auftreten. Wie die Werte z.B. der 1. Armschwinge in Pos. 4 des Schaftes (Pos. 0 der Innenfahnen-äste) zeigen, wird die geringe Asthöhe von 29/80 mm (gegenüber 34/80) durch eine höhere Flächendichte von 3,2 (= 80/25 T) ausgeglichen.

Wie sind nun die Festigkeitsverhältnisse innerhalb der Schwungfedern des Flügels zu deuten?

Die Strömungsverhältnisse am Vogelflügel sind so beschaffen, daß an der Flügeloberseite ein Sog auftritt, an der Unterseite ein Überdruck. Nach ZIMMER, STOLPE, MÜLLER und anderen hat sich durch Messung an einem Flügel ergeben, daß etwa 2/3 der gesamten

Luftkraft von der Saugwirkung der Oberseite und nur $1/3$ von der Druckwirkung der Unterseite herrühren, und die Druckunterschiede an der Flügelvorderkante bedeutend größer als an der Flügelhinterkante ausfallen. Größter Druck herrscht an der höchsten Stelle des Profils, also etwa hinter der Flügelvorderkante; an der Flügelspitze ist es der Bereich der äußeren Handschwingen, von denen jede einzelne im Querschnitt ein ähnliches Profil wie der Flügel aufweist.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen wird die abnehmende Festigkeit der Schwungfedern mit zunehmender Entfernung von der Flügelvorderkante verständlich, entspricht sie doch den abnehmenden Luftkräften. Auch die ähnlichen Festigkeiten innerhalb der Außenfahnen der äußeren Schwungfedern läßt sich mit dem Druckmaximum in diesem Flügelbereich erklären. Die bei den hinteren Handschwingen und bei den Armschwingen fehlenden Festigkeitsunterschiede von Innen- und Außenfahne sind mit der besonderen Stellung dieser Federn im Flügelganzen und den damit verbundenen besonderen Strömungsverhältnissen zu erklären. Diese Federn werden bezüglich If und Af vom Luftstrom gleichmäßig entlang ihrer Schafttrichtung getroffen.

Wie die Untersuchung weiterer Körperfedern ergibt, haben von allen Federn die äußeren Handschwingen die größte Festigkeit. Dies beweisen auch die Stoßfedern:

Äußerste linke Stoßfeder (Abb. 56)

Die etwa 16 cm lange Fahne hat in der Außenfahne mit M-Werten um 320 eine etwas größere Festigkeit als die Innenfahne (263) und ähnelt daher in der Festigkeit den hinteren Handschwingen. Die Außenfahnenäste sind mit 17 mm Länge nur halb so lang wie die Innenfahnenäste und haben auf Grund geringerer Schaftastwinkel auch kleinere Astdichten vorzuweisen.

3. Stoßfeder

Die etwa 16 cm lange Fahne besitzt in Af und If gleich große Festigkeitsmaxima in Schaftnähe, obwohl die If-Äste fast doppelt so lang sind wie die Af-Äste. Gegenüber der äußersten Stoßfeder nimmt die Fahnenfestigkeit weiter ab, was schließlich in den geringen Festigkeitswerten der mittleren Stoßfedern am deutlichsten zu sehen ist. Diese besitzen ein Festigkeitsmaximum,

das nur noch dem 4. Teil des Außenfahnenwertes entspricht. Af- und If-Äste sind gleich lang, und die Fahnenlänge der mittleren Stoßfedern beträgt 16 cm.

Offensichtlich bestehen auch Fahnenfestigkeitsunterschiede innerhalb der Geschlechter einer Vogelart, wenn ♀ und ♂ unterschiedlich groß sind:

Das leichtere Sperbermännchen beispielsweise besitzt auch weniger feste Federn als das größere Sperberweibchen.

Das Festigkeitsmaximum der Außenfahne der 1. HS (Abb. 57) liegt beim Männchen bei 1 100, beim Weibchen bei 1 500, das Innenfahnenmaximum bei 550 bzw. 700, Fahnenlänge ♂ 11 cm, bzw. ♀ 14 cm.

Weiter ist die Tatsache bemerkenswert, daß auch die äußerste Feder des Daumenfittichs eine verhältnismäßig große Festigkeit aufweist, was ihrer funktionellen Bedeutung entspricht.

So ist beim Sperber die Außenfahne dieser Feder in Schaftnähe mit einem Festigkeitsmaximum von 800 versehen, die Innenfahne mit einem M-Wert von ca. 300. Gegenüber der 11 cm langen 1. HS ist die Daumenfeder nur 11 cm groß (Abb. 58).

Wenden wir uns nun den Federn anderer Vogelarten zu.

Aus der Fülle des von mir untersuchten Materials wählen wir Federn aus mit gleicher oder ähnlicher Lage im Vogelkleid und beschränken uns außerdem nur auf die Schwungfedern des Flügels. Die am Sperber aufgezeigten Tendenzen im Verhalten der Festigkeiten der Federn des Vogelkleides gelten mehr oder weniger für alle flugfähigen Vogelarten, so daß ein Vergleich aller einander entsprechenden Federn des Vogelkleides nicht notwendig erscheint.

Die äußerste Handschwinge des Steinadlers (Abb. 59,60)

Die Federfahne ist 27 cm lang. Die Außenfahne ist mit Astlängen von 30 mm auf Grund der kleinen Schaftastwinkel bedeutend schmaler als die Innenfahne, die im mittleren Fahnenbereich Astlängen von 38 mm aufweist. Das Af-Festigkeitsmaximum liegt bei Pos. 6 und ist mit 2600 fast 1,5 mal so groß wie das der If, das bei Pos. 10 auftritt.

Wie bei allen äußersten Handschwingen ist auch bei der Adlerfeder die Lage des Af-Maximums deutlich proximaler als die des If-Maximums.

Steinadler 4. Handschwinge (Abb. 61)

Die Fahne hat eine Länge von 45 cm und ist im Erscheinungsbild dadurch gekennzeichnet, daß sowohl Außenfahne wie Innenfahne von der Federmitte ab gegen die Federspitze deutlich schmaler werden. Im Zuge dieser Verschmälerung tritt nun an der Af ein Festigkeitsmaximum von 2 800 auf, das lagemäßig genau dem Übergangsbereich von breiter zu schmaler Fahne entspricht. Deutlich wird außerdem das abrupte Abnehmen der Astdichte an dieser Stelle in Verbindung mit kleiner werdenden Schaftastwinkeln. Die Astlängen bleiben dagegen mit 30 mm Länge über die Schaftlänge hinweg verhältnismäßig konstant, lediglich im Übergangsbereich sind die Äste kürzer. Die Verschmälerung der beiden Federfahnen, die bei den Handschwingen vieler Vögel zu beobachten ist, wurde bereits von AHLBORN beschrieben und steht im Zusammenhang mit dem Auseinanderweichen der Federn am aktiven Flügel mit dem Zweck, das Freiwerden der Federspitzen zu ermöglichen. Diese Spalten der Flügelspitze in die einzelnen Schwungfedern ist nach HERTEL notwendig, um eine hohe Luftkraft mit Hub- und Vortriebskomponenten zu sichern, wobei die einzelnen Federn sich zum Luftstrom optimal einstellen. Eine geschlossene Flügelfläche eines breiten Flügels kann diese vortreibende Wirkung, insbesondere am Anfang des Fluges, nur durch Drehung um den Flügelvorderrand erzielen, was aber der breite Flügel nicht so ohne weiteres zuläßt. Mit langen und schmalen Flügeln, wie sie beispielsweise der Albatros aufweist, können dagegen leicht entsprechende Drehungen vollführt werden, um aerodynamisch günstigen Vortrieb zu erhalten. Daher fehlen auch an solchen Flügeln adlerähnlich gestaltete Schwungfedern. Das Festigkeitsmaximum der Außenfahne ist durchaus vergleichbar mit dem der 1. HS und beweist wieder, daß die äußerste Handschwinge nicht die am stärksten gebaute Feder sein muß, was durch die speziellen Druckverhältnisse -wie bereits erwähnt- auch nicht notwendig ist.

In den Astpositionen 3 und 2 treten zwei Festigkeitsmaxima entlang des Schaftes auf, zwischen denen genau die Übergangsstelle zwischen breiter und schmaler Außenfahne vorliegt. Die Erklärung ist einfach, befinden sich an dieser Stelle doch auch die kürzeren Äste, deren Höhe rascher abnimmt als die der benachbarten Äste.

Das Innenfahnenmaximum von 1 600 liegt bei Schaftposition 7 und ist damit an das der Außenfahne näher gerückt. Wertmäßig stimmt es mit dem Festigkeitsmaximum der Innenfahne der 1. HS fast überein.

Steinadler 16. Handschwinge (= 6.Armschwinge)

Die etwa 26 cm lange Fahne hat in Schaftposition 5 der Außenfahne ein Festigkeitsmaximum von 400, in Pos. 6 der Innenfahne nahezu gleiche Werte. Die Astlängen betragen in diesen Fahnentteilen 65 mm bzw. 60 mm.

Steinadler äußerste Stoßfeder

Die Festigkeitsmaxima betragen 1 100 in der Af, 900 in der If. Sie liegen in Schaftposition 7 bzw. 8 der etwa 18 cm langen Federfahne.

Betrachten wir zum Abschluß noch eine Rückenfeder des Steinadlers. Hier treten in Federmitte Festigkeitsspitzenwerte von 100 auf, sowohl in rechter wie in linker Fahnenhälfte. Das Festigkeitsmaximum der Af der 1. HS ist somit rund 300 mal größer als das der Rückenfeder. Die Äste sind zwischen 40 und 50 mm lang, und die Astdichten liegen in diesem Bereich bei 1,8. Es stimmen auch die Winkel überein.

Es kann festgestellt werden, daß auch im Federkleid des Steinadlers ähnliche Festigkeitsänderungen innerhalb der Federfahnen auftreten wie beim Sperber. Die bereits angedeuteten Tendenzen werden durch weitere Vogelarten bestätigt:

Die äußerste Handschwinge des Uhu

Die Federfahne ist 27 cm lang. Es tritt in Pos. 6 des Schaftes ein Festigkeitsmaximum in der Außenfahne von ca. 1 300 auf, dem weiter distal in Pos. 10 ein Innenfahnenmaximum von ca. 700 folgt. Es überraschen die kleinen Werte bei dieser doch recht großen Eulenart.

4. Handschwinge

Zwischen den Festigkeitsmaxima von If und Af ist kein großer Unterschied festzustellen. Beide liegen bei 500. Dagegen haben in Astposition 1 die längeren If-Äste mit ca. 400 bedeutend höhere Werte als die recht kurzen Af-Äste. Hier ist bei konstanten Flächendichten und Astbreiten wieder das rasche Abnehmen der Af-Asthöhen ausschlaggebend, die nur noch $\frac{2}{3}$ des Wertes der If-Asthöhen einnehmen.

Die 16. Schwungfeder des Uhuflügels hat in der Lage übereinstimmende Festigkeitswerte von Af und If, die maximal unter dem Wert 100 liegen, obwohl die Federfahne mit 22 cm Länge recht groß ist.

Beim Waldkauz treten in der 12 cm langen Federfahne der 1. Handschwinge in der Außenfahne maximale Werte von 545 auf, in Schaftposition 3 der If Werte von 224. Die 2. HS ist mit Af-Spitzenwerten von 737 ausgezeichnet, die deutlich über denen der 1. HS liegen und auch größer sind als das If-Maximum mit ca. 544.

Ursache für diese Werte sind die großen h-Werte dieser Feder. Die M-Werte der folgenden Schwungfedern nehmen zu den körpernäheren Flügelteilen ab und betragen bei den innersten Armschwingen nur noch ca. 70.

E. Zusammenhänge zwischen Fahnenfestigkeit, Körpergewicht und spezifischer Flächenbelastung

Vergleicht man nun die maximalen Festigkeitswerte von If und Af der äußeren Handschwingen verschiedener Vogelarten miteinander, so zeigt sich, daß trotz identischer Lage im Federkleid sehr unterschiedliche Werte auftreten.

Diese Tatsache leuchtet ein, wenn man an die unterschiedlichen Gewichts- und Flügelflächenverhältnisse der einzelnen Vogelarten denkt und an die damit verbundenen unterschiedlichen Flügelbelastungen. Um einen genaueren Zusammenhang zwischen der Fahnenfestigkeit und den genannten Größen herauszufinden, beschränken wir uns auf Federn mit gleicher Lage im Federkleid und hierbei auf die äußerste Schwungfeder. Was ihre Festigkeitsverhältnisse angeht, so kann sie als stellvertretend für alle vorderen Handschwingen gelten; auch ihre aerodynamische Bedeutung im Flügel prädestiniert sie zu der bevorzugten Behandlung. Wie schon angedeutet scheint eine Beziehung zwischen Fahnenfestigkeit einerseits, Körpergewicht und Flügelfläche andererseits vorzuliegen.

Der Quotient aus Körpergewicht und Flügelfläche, die spezifische Flächenbelastung (kg/m^2), stellt eine wichtige Größe dar, die das Flugvermögen der Vögel beeinflusst. Die Flächenbelastung gibt den im Durchschnitt auf die Flächeneinheit des Flügels wirkenden Druck an. Die Veränderlichkeit des Flügels beim Flug führt automatisch zu verschiedenen Flächenbelastungen, so daß ein genauer Wert für eine Vogelart nicht angegeben werden kann. HERTEL, der eine Tabelle nach Untersuchungsergebnissen von HARTMANN aufstellt, kennzeichnet daher die Flächenbelastung durch den Maximal- und Minimalwert, der entsprechend der größten und kleinsten Flügelentfaltung beim Flug zu erwarten ist.

Da ein fliegender Körper Vor- und Auftriebskräfte spart, wenn er möglichst leicht ist, besteht die Tendenz in einer Herabsetzung des Fluggewichts auf ein geringes Maß. Die als Tragflächen ausgebildeten Flügel bilden in Verbindung mit den besonders stark beanspruchten Handfedern einen Bewegungsapparat, der den vielfältigen aerodynamischen Anforderungen des Fluges, den unterschiedlichen Körpergewichten usw. angepaßt sein muß und darüber hinaus noch möglichst leicht sein soll. Der Flügel stellt also einen Kompromiß gegenüber all diesen Forderungen dar. Es sind auch die Vögel untereinander wieder so spezialisiert, daß sich eine Vogelart optimal im freien Flug fortbewegt, die andere besser im Segelflug.

Was folgt daraus für die Festigkeit der am Fliegen maßgeblich beteiligten Handfedern? Es ist zu vermuten, daß die Bauteile der Federfahne eine Anpassung an unterschiedliche Größenverhältnisse der Flügel bzw. an besondere Flugtechniken zeigen.

Um dies herauszufinden, werden in der folgenden Tabelle (Tab. 62) die Festigkeitsverhältnisse lagemäßig gleicher Schwungfedern der verschiedensten Vogelarten miteinander verglichen unter Berücksichtigung des Körpergewichts der Vögel, der spezifischen Flächenbelastung und der Flügelfläche.

In der Tabelle sind zunächst die einzelnen Vogelarten nach steigenden Festigkeitswerten der Außenfahne ihrer 1. HS geordnet. Man erkennt, daß die Fahnenfestigkeit offensichtlich in bestimmten Fällen proportional zum Körpergewicht, bzw. zur spezifischen Flächenbelastung ist. Die Tabelle beginnt beim Goldhähnchen mit der geringsten Flächenbelastung und dem kleinsten Gewicht und endet mit Auerhahn und Graugans, die höchste Werte bezüglich Körpergewicht und Flächenbelastung aufweisen.

Aus den vorliegenden Daten ist zu erkennen, daß aber weder das Körpergewicht noch die spezifische Flächenbelastung allein als direktes Maß für die Festigkeit anzusehen sind, denn es treten immerhin mit Uhu, Steinadler, Ziegenmelker, Dohle und Turmfalke Vögel auf, deren spezifische Flächenbelastung nicht dieser Regel folgt, bzw. mit Ziegenmelker, Sperber, Stockente, Graugans und Uhu Vögel, deren Gewicht aus dem Rahmen fällt.

Aus den vorliegenden Daten läßt sich jedoch eine noch etwas genauere Beziehung zwischen Fahnenfestigkeit, Körpergewicht und Flügelfläche ableiten, die meines Erachtens für viele Vögel zutrifft und daher eine gewisse allgemeine Bedeutung hat. Zur Ableitung dieser Beziehung betrachten wir zunächst die Festigkeitsverhältnisse aller Vogelarten mit ähnlichem Gewicht, jedoch unterschiedlicher Flächenbelastung (Bussard, Habicht, Stockente). Die Daten lassen erkennen, daß in diesen Fällen die Festigkeit mit der Flächenbelastung wächst.

Vergleichen wir dagegen die Federn von Vögeln mit gleicher Flächenbelastung, aber unterschiedlichem Gewicht (Dohle, Turmfalke, Sperber, Bussard), so stellt man eine Zunahme der Federfestigkeit bei steigendem Gewicht fest. Damit sind aber die notwendigen Voraussetzungen der Abhängigkeit von M mit G und G/F gegeben, so daß man setzen kann:

$$M \sim G \cdot G/F = G^2/F \quad (12) \quad h^2/(1+d/b) \sim G^2/F \quad (13)$$

Die Werte zeigen, daß es auch von dieser Regel Ausnahmen gibt. Trotzdem wird diese Beziehung für viele Vögel ihre Berechtigung haben, wenn man folgende Überlegung zugrunde legt.

Bei gleicher Flächenbelastung, aber unterschiedlichem Gewicht hat von zwei Vogelarten das schwerere Tier die größere Flügelfläche, die sich natürlich auch durch größere Federn bemerkbar macht. Größere Federn zeichnen sich sowohl durch längere Schäfte, als auch durch längere, höhere und breitere Äste aus, wenn sie in ihrer Lage im Federkleid identisch sind.

Bei gleichem Gewicht, aber unterschiedlicher Flächenbelastung besitzt das Tier mit der höheren Belastung die kleinere Flügelfläche und ist dadurch auch hinsichtlich seiner Federfahnelemente einer höheren Kraftwirkung ausgesetzt.

Die in der letzten Spalte der Tabelle eingetragenen Werte für G^2/F zeigen das abweichende Verhalten von Sperber, Uhu und Ziegenmelker von der oben genannten Proportionalität. Zunächst muß festgestellt werden, daß eine mathematische Ableitung gesetzmäßiger Beziehungen zwischen M und G^2/F nicht möglich ist. Wenn eine Proportionalität erkannt wird, dann nur auf Grund experimenteller Daten.

Es ist naheliegend, daß verschiedene Faktoren das Bild trüben. Solche Faktoren sind zunächst Fehlerquellen beim Messen der Festigkeitswerte und der spezifischen Flächenbelastungen. Die M-Werte beispielsweise stellen ja nur Richtwerte dar, die starke Unterschiede in den Federfahnen verschiedener Federn zwar aufzeigen, jedoch innerhalb gewisser Grenzen (wie bereits ausgeführt) Schwankungen unterworfen sind.

Zusätzlich kommen Faktoren hinzu, deren Ursache nicht in fehlerhafter Messung liegt, sondern in der besonderen Lebensweise vieler Vogelarten.

Die spezifische Flächenbelastung, die zunächst nur für Vögel mit voll ausgebreiteten Flügeln gilt, erlaubt keine Aussage über die tatsächliche Flügelbelastung die aufgrund spezieller Flugtechniken auftritt. Der Sperber beispielsweise wird als Vogel mit extrem harten Federfahnen in der Literatur geschildert, die mit der Flugweise in Verbindung gebracht werden.

Da auch andere Vogelarten eine spezielle Flugtechnik besitzen, ist die Flächenbelastung auch kein endgültiges Mittel zur Bestimmung der tatsächlichen Beanspruchung der Federelemente beim Flug.

Es muß außerdem bedacht werden, daß in der Tabelle nur das Festigkeitsmaximum der Außenfahnen Berücksichtigung findet und dieses durchaus von Werten der folgenden Handschwingen übertroffen werden kann.

Eine Bestimmung der Gesamtfestigkeit der Schwungfederfahne (etwa durch Summation aller Einzelwerte) dürfte meiner Meinung nach aber auch keine stark abweichenden Ergebnisse bringen und ist darüber hinaus nahezu undurchführbar.

Wie die besondere Lebensweise Ursache für eine bestimmte Fahnenfestigkeit sein kann, zeigt gut der Uhu, der trotz seines großen Gewichtes eine ziemlich weiche Fahne besitzt und innerhalb gleichschwerer Vögel an der untersten Grenze der Wertskala liegt. Ähnliche Verhältnisse finden wir auch bei den anderen Eulenarten. Es macht sich also auch innerhalb der Fahnenfestigkeit (Biegefestigkeit) bei dieser Vogelgruppe das Prinzip der Weichgestaltung der Fahne bemerkbar, das eine notwendige Voraussetzung für einen geräuscharmen Flug darstellt.

Gute Flieger wie Stockente, Graugans, Sperber besitzen festere Federfahnen als Segler wie Adler, Bussard (selbverständlich ist dabei das Gewicht zu berücksichtigen). Der schnelle Mauersegler liegt mit seiner Fahnenfestigkeit erheblich über den Werten, die bei Vögeln mit ähnlichem Gewicht zu erwarten sind. Eine interessante Vogelart ist außerdem der Auerhahn. Er besitzt von allen untersuchten Vogelarten zwar Federäste mit größter Höhe, die aber sehr dünn sind. Daher liegt er festigkeitsmäßig nicht am Ende der Wertskala.

III. GESETZMÄßIGE BEZIEHUNGEN IN BAU UND ANORDNUNG DER STRAHLEN

A. Gültigkeit des allgemeinen Federgesetzes

Die morphologischen Verhältnisse der Strahlen sind bekannt. Ein einzelner Strahl gliedert sich in Basallamelle und Pennulum. Durch eine Torsion an ihrer Wurzel liegt die Basallamelle horizontal in der Ebene der Federfläche, das Pennulum steht dazu mehr oder weniger senkrecht.

Basallamelle und Pennulum sind differenziert, wobei letzteres verschiedenartige dorsale und ventrale Fortsätze aufweist, von denen besonders die Hamuli für die Hakenstrahlen charakteristisch sind. Bei den Bogenstrahlen finden sich an der dorsalen Krempe Widerlager, die für den Verhakungsmechanismus von Bedeutung sind.

Auf spezielle Baueigentümlichkeiten der Strahlen, die im Zuge besonderer Lebensweise bei den einzelnen Vogelarten auftreten können, soll nicht eingegangen werden, zumal darüber bereits grundlegende Arbeiten existieren.

In dieser Arbeit interessieren die Gesetzmäßigkeiten, die sich aus der Radienanordnung ableiten lassen. Sie entsprechen formal der bereits bekannten Beziehung $D = D' \sin \alpha$.

Die theoretische Ableitung und praktische Überprüfung dieser für Haken- und Bogenstrahlen gleichermaßen geltenden Gesetzmäßigkeiten erfolgt analog der Ableitung bei den Ästen und soll deshalb nicht mehr weiter besprochen werden. Die Tatsache, daß das Gesetz $D = D' \sin \alpha$ auch für die Strahlen Gültigkeit besitzt, ist einleuchtend, wenn man bedenkt, daß die Strahlen in gleicher Weise am Ast angeordnet sind wie die Äste am Schaft.

Zur Kennzeichnung der Strahlen allgemein, der Haken- bzw. Bogenstrahlen im besonderen, werden die Symbole für Dichte, Flächendichte und Winkelstellung mit den Indizes (S), (H) und (B) versehen. Es gilt dann:

$$D_S = D'_S \cdot \sin \alpha'_S$$

$$D_H = D'_H \cdot \sin \alpha'_H$$

$$D_B = D'_B \cdot \sin \alpha'_B \quad (14)$$

Es gibt in der Literatur keinerlei Hinweis auf diese gesetzmäßigen Zusammenhänge, obwohl bereits die Winkelstellung der Radian und ihre Dichte untersucht wurden. In erster Linie wäre hier wieder MASCHA zu nennen, der Angaben über die Winkelstellung macht, desgleichen auch VILTER, DURRER, HERTEL und andere. Was die Radiendichte betrifft, verfahren HERTEL und MASCHA so, daß sie lediglich die Größe der Radianabstände angeben. Aus diesen Angaben ist jedoch nicht ersichtlich, ob es sich um die Abstände u - lotrecht zur Strahlrichtung gemessen und dem reziproken Wert der Flächendichte entsprechend - handelt oder um die Abstände a , die entlang des Astes gemessen werden und die dem reziproken Wert der Strahlendichte gleichzusetzen sind. Wie ein Vergleich mit den eigenen Meßwerten zeigt, handelt es sich bei den von beiden Autoren genannten Abständen um den reziproken Wert der Radiendichte.

An dieser Stelle muß noch ein wichtiger Hinweis auf die Methode des Winkelmessens angebracht werden. Die Messung erfolgt bei horizontaler Lage der Federfahnenfläche, was auch aus den von HERTEL gezeigten Fotografien hervorgeht. Die in der Beobachtungsebene gemessenen Winkel müssen jedoch geringfügig von den tatsächlichen Werten abweichen, da sowohl Haken- wie Bogenstrahlen eines Astes eine Ebene bilden, die zur Beobachtungsebene etwas geneigt ist. Daraus folgt auch, daß sich die Flächendichte D' geringfügig von der tatsächlichen unterscheidet. Der gesetzmäßige Zusammenhang der in der Beobachtungsebene gemessenen Größen bleibt davon unberührt!

Im folgenden soll in den verschiedenen Bereichen von Innen- und Außenfahne einer Schwungfeder der gesetzmäßige Zusammenhang $D_S = D'_S \cdot \sin \alpha_S$ näher untersucht werden.

Die Meßwerte sind tabellarisch geordnet. In den senkrechten Tabellenspalten sind zunächst die Schaftmarkierungspunkte angegeben, an denen die dort inserierenden Äste bezüglich Dichte, Winkelstellung und Flächendichte ihrer Radian näher untersucht werden. Dabei werden diese Größen an 3 Punkten des Astes gemessen: am Astanfang, in Astmitte und am Astende. Die erhaltenen Meßwerte sind unter A, B und C in die waagrechten Spalten eingetragen, wobei die Werte für die Hakenstrahlen gesondert von denen der Bogenstrahlen aufgeführt werden. Um das Tabellenbild abzurunden,

sei vermerkt, daß in jeder Schaftposition die Werte für die Innenfahnenstrahlen und für die Außenfahnenstrahlen getrennt von einander festgehalten sind.

B. Untersuchung der Strahlen verschiedener Schwungfedern

Die Untersuchung der 4. HS eines Turmfalken bringt folgendes Ergebnis: (Tab. 63, Abb. 63)

Die Strahlendichten schwanken bei den Bogenstrahlen zwischen 20 und 30, bei den Hakenstrahlen zwischen 33 und 50. Man erkennt, daß die Zahl der Hakenstrahlen größer ist als die der Bogenstrahlen. Was die Flächendichte angeht, so treten bei den Bogenstrahlen Werte zwischen 45 und 70 auf, bei den Hakenstrahlen Werte zwischen 50 und 70. Offensichtlich sind sich also Haken- und Bogenstrahlen in ihren Flächendichten ähnlicher als in ihren Dichten.

Im einzelnen erkennt man folgende für Außen- und Innenfahne gleichermaßen geltende Gesetzmäßigkeiten:

1. An jedem Ast ist die Winkelstellung der Hakenstrahlen größer als die der Bogenstrahlen. Die Beobachtung hat bereits VILTER (1934) gemacht.

Bei MASCHA dagegen ist kein Hinweis auf Unterschiede in der Winkelstellung von Haken- und Bogenstrahlen vorhanden, denn er gibt für beide Werte von 30° bis 40° an.

Diese Werte bedürfen unbedingt der Korrektur, wenn man mit Hilfe der Federgesetze eine genauere Analyse durchführt.

Es ergibt sich dann -bei nahezu konstanter Flächendichte- eine unterschiedliche Winkelstellung, die die größere Dichte der Hakenstrahlen verursacht.

Die läßt sich mit dem Gesetz $D_S = D'_S \cdot \sin \alpha_S$ veranschaulichen:

$$D'_H \approx D'_B = K$$

$$\sin \alpha_H = \frac{D_H}{K} \quad \sin \alpha_B = \frac{D_B}{K} \quad \text{aus } \alpha_H > \alpha_B \Rightarrow D_H > D_B$$

SICK, der die Gesetzmäßigkeit nicht kennt, vermutet, daß ein noch dichteres System von Bogenradienkrempen durch den räumlich nicht zu erweiternden Hamuluskomplex nicht wirkungsvoll ausgenutzt werden könne. Dieser Ansicht muß ebenfalls widersprochen werden, da bei gleicher Hamulizahl und gleicher Basallamellenausbildung eines Strahls die Dichte

der Hakenradien bereits durch größere Winkelstellung anwächst und somit auch die Zahl der Hamuli.

Was nun die ungleiche Winkelstellung der Haken- und Bogenstrahlen angeht, so stellen nach SICK die Bogenstrahlen beim Auseinanderweichen der Rami den an ihnen ziehenden Hakenstrahlen einen noch mehr ausfedernden Widerstand entgegen, wobei sich dann die Winkel der beiden Radiensysteme ausgleichen dürften.

In diesem Zusammenhang sei auch etwas zum Verhakungsmechanismus der Strahlen gesagt. Aus dem Verhältnis der Dichten von sich überkreuzenden Haken- und Bogenstrahlen zweier nebeneinander liegender Äste folgt sofort, daß keineswegs einem Hakenstrahl ein Bogenstrahl zugeordnet ist; vielmehr muß nach HERTEL ein "Prinzip der Bindung ohne Passung" vorliegen, also eine Art Klettenprinzip, bei dem die passungsfreien Fügungen der Strahlen getrennt und wiederhergestellt werden können. Daher werden die älteren Verhakungsschemata, wie sie von HEMPEL, GREITE und anderen entworfen wurden, den morphologischen Befunden nicht gerecht.

2. An jedem Ast nimmt von basal nach distal die Dichte der Hakenstrahlen etwas ab, da gleichzeitig die Winkel zwischen Ast und Strahl zur Astspitze hin kleiner werden. Bei mehr oder weniger gleichbleibender Flächendichte der Strahlen ist diese Tendenz aus dem Gesetz $D_H = D'_H \cdot \sin \alpha_H$ abzuleiten. Bei den Bogenstrahlen ist ein Abnehmen von Dichte und Winkelstellung auch feststellbar, wenngleich schwächer ausgeprägt. (Abb. 64, 65)
- Daraus folgt, daß sich Haken- und Bogenstrahlen zur Astspitze hin unter immer kleiner werdenden Winkeln kreuzen müssen. Setzen wir für diesen Überkreuzungswinkel β , ist aus Abb. 1 b zu entnehmen, daß

$$\beta = \alpha_H + \alpha_B \quad \text{ist.} \quad (15)$$

Je kleiner die Winkel der Haken- und Bogenstrahlen sind, desto kleiner ist ihre Winkelsumme und damit ihr Überkreuzungswinkel.

Eine Erklärung für diese Erscheinung könnte meines Erachtens darin liegen, daß insbesondere die Äste der Innenfahne bei Flugbeanspruchung am Federrand stärker auseinandergedehnt werden als in Schaftnähe. Daher müssen die distalen Radien der Dehnung einen größeren ausfedernden Widerstand entgegensetzen als die proximalen, der durch eine entsprechend spitzere Winkelstellung zwischen den sich kreuzenden Haken- und Bogenstrahlen eher gewährleistet erscheint. Beim Vergleich der Arm- und Handschwingen und einander entsprechender Federn unterschiedlicher Vogelarten sind zusätzlich folgende Beobachtungen zu machen:

3. In den Bereichen der Schwungfederaußenfahne, die unmittelbar vom Luftstrom getroffen werden, deutet sich eine leichte Zunahme der Radiendichte gegenüber der Innenfahne an. Ausgeprägt liegt dieser Zustand bei der Af der 1. HS (Tab. 66) des Turmfalken vor, wo die Region B die D_B - und D_H -Werte der Strahlen größer sind als die der Innenfahne. Da gleichzeitig zwischen Af und If nur geringe Unterschiede in den Flächendichten der Radien bestehen, ist nach $D_S = D'_S \cdot \sin \alpha_S$ für die Strahlen der Af eine größere Winkelstellung gegenüber den Strahlen der If zu erwarten.

SICK, der die Winkelverhältnisse nicht untersucht, sieht in der besonderen Gemeinschaft der Radien der Außenfahne, die sich v.a. in den kräftigen Basallamellen und Pennula der Hakenstrahlen äußert, eine wichtige Barriere gegen ein allzu enges Zusammenrücken der Außenfahnenäste bei Flugdruck. Diese abstemmende Wirkung der Hakenstrahlen gegenüber dem nächst höheren Ramus könnte meines Erachtens durch ihre größere Winkelstellung verstärkt werden, und damit wären die oben genannten Tendenzen verständlich. Ähnliches ist auch von den Bogenstrahlen zu sagen, die im Af-Bereich morphologisch mit den Hakenstrahlen zu vergleichen sind.

Eine geringe Zunahme der Strahlendichten ist bei manchen Vogelarten auch in den Außenfahnenanteilen der Handschwingen festzustellen, die unmittelbar vom Luftstrom getroffen werden.

Bestes Beispiel wären etwa die 5. HS des Steinadlers und die 3. HS des Rauhußbussards:

So steigt in Abschnitt B eines Astes der Af der 5. HS des Steinadlers die Dichte der Hakenstrahlen von federproximal nach distal von 32 auf 40 an, die Dichte der Bogenstrahlen von 22 auf 30. Da in allen Fällen die Flächendichte der Strahlen konstant bei 48 liegt, ist eine entsprechende Winkelvergrößerung die Ursache für das Anwachsen der Dichten. Im Bereich der freien Außenfahne sind -bedingt durch größere Winkelstellung- Haken- und Bogenstrahlen auch dichter als im gegenüberliegenden Innenfahnenbereich, wo die D_H -Werte nur 29 und die D_B -Werte nur 23 erreichen. Diese Wertunterschiede sind bei den Radien von Innen- und Außenfahne des proximalen Federbereiches nicht festzustellen. Im freien distalen Außenfahnenbereich der 3. HS des Rauhußbussards erhöht sich gegenüber dem proximalen Fahmenteil die Dichte der Hakenradien im Abschnitt B von 32 auf 39, die Dichte der Bogenradien von 19 auf 26. Die Innenfahne dagegen weist über eine große Schaftlänge hinweg im Astabschnitt B Werte von 32 bei den Hakenstrahlen, von 19 bei den Bogenstrahlen auf.

Es muß aber gesagt werden, daß nicht alle Vogelarten dieser Tendenz folgen; insbesondere findet man bei der Untersuchung einander entsprechender Federn verschiedenster Vogelarten bestätigt, was bereits MASCHA und SICK festgestellt haben, daß nämlich die meisten Feinstrukturen der Federn unterschiedlichster Vogelarten in der absoluten Größe sehr ähnlich sind und daß kein Zusammenhang zwischen Körpergröße des Vogels und Breite der Radien Basallamelle besteht, auch nicht zwischen dem Gewicht des Vogels und der Radiendichte.

Die Schwungfedern großer Vögel haben also auf Grund größerer Schaft- und Astlängen sowohl relativ als auch absolut mehr Radien aufzuweisen als die Federn kleiner Vögel. MASCHA deutet diese Tatsache damit, daß aus funktionellen Gründen eine gewisse Grenze der Strahlenabstände nicht überschritten werden darf.

C. Erweiterung des Federgesetzes und Zusammenhänge zwischen Festigkeit und Strahlenanordnung

Zum Abschluß der Betrachtungen über die Strukturverhältnisse der Vogelfeder soll noch auf Zusammenhänge zwischen den Federgesetzen der Radien und Rami hingewiesen werden, die letztlich eine Möglichkeit bieten, den Einfluß der Radien auf die Festigkeit der Federfahne mit zu berücksichtigen.

Den Ansatzpunkt hierfür bietet der freie Abstand d zwischen zwei Fahnenästen.

Die Größe d kann aus Winkelstellung und Basallamellenlänge der Haken- und Bogenstrahlen berechnet werden. Nach Abb. 1 b gilt:

$$d = \sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B \quad (15)$$

In dieser Beziehung bedeuten l_H , l_B die Längen der Basallamellen der Haken - bzw. Bogenstrahlen vom Gesims bis zum Schnittpunkt zwischen Strahlrichtung und Verhakungslinie von Haken- und Bogenstrahlen.

Auf Grund der gesetzmäßigen Beziehung $D_S = D'_S \cdot \sin \alpha_S$ kann man an Stelle der $\sin \alpha$ -Werte den Quotienten D_S/D'_S einsetzen.

$$d = (D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B$$

Somit erhält man erweiterte Fassungen des allgemeinen Federgesetzes.

$$D = \sin \alpha / (b + d) \quad D = \sin \alpha / (b + \sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B) \quad (16)$$

$$D = \frac{\sin \alpha}{b + (D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B}$$

Die Festigkeit der Federfahne in einem beliebigen Punkt ergibt sich dann aus folgendem morphologisch-mathematischen Zusammenhang:

$$M = \frac{h^2}{1 + d/b} = \frac{h^2}{1 + (\sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B)/b} = \frac{h^2}{1 + \frac{(D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B}{b}}$$

Diskussion:

d hängt in erster Linie von l_B und l_H ab, da die Winkelstellung der Haken- und Bogenstrahlen innerhalb enger Grenzen variiert. Wie aus Abb. 1 b zu ersehen ist, können l_B und l_H unabhängig von $\sin \alpha_S$ (und damit von D_S/D'_S) Werte annehmen, so daß ein theoretisch zu begründender Zusammenhang zwischen $\sin \alpha$ einerseits, l_H und l_B andererseits nicht besteht.

Es wurde aber bereits darauf hingewiesen, daß die Flächen-dichte der Äste gewissen Veränderungen sowohl innerhalb der Federfahne wie innerhalb der Federn des Flügels unterliegt. Sie nimmt bei der Innenfahne vom Schaft zum Federrand hin ab, bei den Außenfahnenästen dagegen bleibt sie ziemlich konstant oder nimmt geringfügig zu. Desgleichen ist ein Schwinden der Astflächendichten von den äußeren zu den inneren Schwungfedern des Flügels festzustellen.

Da $d = l/D' - b$, können diese Tendenzen folgendermaßen erklärt werden:

Die zum Federrand hin abnehmende Astflächendichte der Innenfahne führt bei nahezu gleichen oder geringfügig kleiner werdenden Astbreiten zu wachsenden d -Werten, die wiederum durch Zunahme der l_H - bzw. l_B -Werte ausgelöst werden müssen, da nach $d = \sin\alpha_H l_H + \sin\alpha_B l_B$ die Summe aus beiden Produkten zunimmt und dies auf Grund abnehmender Winkel nur durch starkes Anwachsen der Basallamellenlängen möglich ist.

Dies ist tatsächlich zu beobachten und wird auch von anderen Autoren erwähnt.

Die genannten Gesetzmäßigkeiten führen auch zu größeren Basallamellenlängen der Armschwingeradien gegenüber den Handschwingeradien.

Bei den Außenfahnenästen ist auf Grund relativ konstanter d - und b -Werte vom Schaft zum Federrand hin eine Zunahme der Basallamellenlängen schwächer ausgeprägt. Die Winkelstellung der Strahlen folgt ähnlichen Tendenzen wie in der Innenfahne.

Des weiteren läßt sich auch der Zusammenhang zwischen Wellung der Federinnenfahnen und Radienausbildung erfassen:

Der Flächenverändernde Quotient Q_F ist bei allen gewellten Innenfahnen größer 1, d.h. den zum Federrand hin abnehmenden D' -Werten entsprechen anwachsende d -Werte.

Diese d -Werte haben ihre Ursache in den zunehmenden Basallamellenlängen der Radien.

Gerade dieses letzte Beispiel beweist, wie sich mit Hilfe mathematischer Methoden im Federbau innerhalb größerer wie kleinerer Strukturen ein Naturgesetz ableiten läßt, das nicht nur die funktionelle Deutung morphologischer Strukturen erlaubt, sondern bislang zueinander beziehungslose Gegebenheiten in einen sinnvollen Zusammenhang stellt.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Die Astdichte D wird definiert und als reziproker Wert der zwischen 2 benachbarten Ästen vorliegenden Schaftstrecke a dargestellt.
2. Astdichte, Schaftastwinkel und Flächendichte stehen bei allen normalen Konturfedern in einem gesetzmäßigen Zusammenhang: $D = D' \cdot \sin \alpha$
Die Flächendichte entspricht maßzahlmäßig dem reziproken Wert der Summe aus Astbreite b und freiem Astabstand d .
3. Die Winkel, die die Außenfahnenäste einer Handschwinge mit dem Schaft einschließen, sind spitzer als die der Innenfahnenäste. Diese Unterschiede in der Winkelstellung sind funktionell erklärbar und lösen bei konstanter Flächendichte entsprechend unterschiedliche Astdichten aus.
4. Die Astdichten der Außenfahnenäste sind kleiner als die der Innenfahnenäste. Bei den äußersten Handschwingen der Eulen gewinnen die Dichten der Außenfahnenäste als Grundlage des Hakenkammes funktionelle Bedeutung.
5. Die Flächendichte der Äste ist morphologisch für jede Vogelart von bestimmter Größe. Sie steht im Zusammenhang mit der Festigkeit der Federfahne.
6. Die Flächendichte des Querschnittsfaktors $b \cdot h^2$ der Äste wird als Maß für die Biegefestigkeit der Federfahne eingeführt. Mit Hilfe des Federgesetzes erhält man folgende Näherungsformel:
$$M = D' \cdot b \cdot h^2 \qquad M = h^2 (1 + d/b)$$
7. Die Näherungsformel zeigt einen Lösungsweg zur Bestimmung der Biegefestigkeit der Federfahne auf und gestattet einen Vergleich der Festigkeiten unterschiedlichster Federarten.

8. Praktische Untersuchungen ergeben, daß die Schwungfeder sowohl in der Außen- wie in der Innenfahne ein Festigkeitsmaximum besitzt, das jeweils in Schaftnähe liegt. Bei den äußeren Schwungfedern ist die Festigkeit der Außenfahne größer als die der Innenfahne. Die Festigkeitsmaxima von If und Af nehmen innerhalb der Schwungfedern von der Flügelvorderkante zur Hinterkante ab.
9. Das Problem der Festigkeit der Schwungfeder bei Flugbeanspruchung erfordert auch eine Deutung der dafür notwendigen Wellung der Innenfahne. Der als Maß für die Flächenveränderung eingeführte Q_f -Wert erlaubt eine Aussage über den Wellungsgrad der Federfahne. Die für die Wellung der Innenfahne notwendige Bedingung ergibt sich aus $Q_f > 1$
10. Die Festigkeit M der Federfahne steht mit dem Körpergewicht G und der spezifischen Flächenbelastung G/F eines Vogels im Zusammenhang. Es deutet sich eine Proportionalität von M mit G^2/F an.
11. Die Radien gehorchen den gleichen Gesetzen wie die Äste.
Es gilt: $D_S = D'_S \cdot \sin \alpha_S$
12. Die Dichte der Hakenradien an einem Ast ist größer als die Dichte der Bogenradien. Die Ursache hierfür liegt in der unterschiedlichen Winkelstellung beider Radiensysteme, wenn die Flächendichte der Radien konstant bleibt.
Die Winkel der Hakenradien sind größer als die der Bogenradien.
13. Entlang zweier benachbarter Äste nimmt der Überkreuzungswinkel zwischen Haken- und Bogenstrahlen von basal nach distal ab.
Diese Tatsache kann funktionell erklärt werden.
14. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Körpergröße eines Vogels und der Dichte bzw. Flächendichte seiner Radien.

15. Die Basallamellenlängen von Haken- und Bogenradien stehen zusammen mit ihren Dichten mit dem Astabstand d in einem gesetzmäßigen Zusammenhang:

$$d = (D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B$$

Damit läßt sich das Federgesetz erweitern und neufassen:

$$D = \frac{\sin \alpha}{b + \sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B} = \frac{\sin \alpha}{b + (D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B}$$

$$D' = 1 / (b + \sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B) = \frac{1}{b + (D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B}$$

16. Der Einfluß der Radien auf die Fahnenfestigkeit kann über die Größe d in die Formel $M = h^2 / (1 + d/b)$ aufgenommen werden:

$$M = \frac{h^2}{1 + (\sin \alpha_H \cdot l_H + \sin \alpha_B \cdot l_B) / b} = \frac{h^2}{1 + \frac{(D_H/D'_H) \cdot l_H + (D_B/D'_B) \cdot l_B}{b}}$$

17. Der Wellung der Federfahne liegt nach obiger Beziehung (15.) eine Steigerung der Basallamellenlängen der Radien zugrunde.

LITERATURVERZEICHNIS UND ANHANG

- | | | |
|--------------------|------|--|
| AHLBORN, F. | 1896 | Zur Mechanik des Vogelfluges.
Abhandl.a.d.Geb.d.Naturwissenschaften.
Hamburg, Bd.XIV. 1-51 |
| BIEDERMANN, W. | 1928 | Vergleichende Physiologie des Integumentes
der Wirbeltiere III.
Ergebnisse der Biologie Bd.3. 388-429 |
| BRONN, H.G. | 1888 | Tierreich. 6.Bd.4.Abt.Vögel.
Zool.Inst.Leipzig u. Heidelberg |
| BROWN, R.H.J. | 1948 | The flight of birds.
Journ.Exp.Biol.25 No.4.S.322-332 |
| CHANDLER, A.C. | 1916 | A study of the structure of feathers,
with reference to their taxonomic
significance.
University of California.Publ.on Zoology.
Vol.13.243-446 |
| CHRISTOLEIT, E. | 1933 | Vogelflug u. Luftbewegung.
Journal für Ornithologie. Bd.81.
D.388-398 |
| DAVIES, H.R. | 1889 | Die Entwicklung der Feder und ihre
Beziehung zu anderen Integumentgebilden.
Morpholog. Jahrbuch 15 |
| DE MEIJERE, J.C.H. | 1896 | Über die Feder der Vögel, besonders ihre
Anordnung.
Morpholog.Jahrbuch 23 |
| DORST, J. | 1972 | Das Leben der Vögel.
By Editions Rencontre Lausanne |
| DRIESEN, H.H. | 1955 | Vogelfedern unter dem Mikroskop.
Mikrokosmos.44 Jahrgang. Heft 9 |
| DURRER, H. | 1965 | Bau und Bildung der Augfeder des Pfaus.
Revue Suisse de Zoologie.Tome 72.No.14
263-412 |
| EXNER, S. | 1906 | Über das Schweben der Raubvögel.
Pflügers Arch.f.d.ges.Physiol. 114 |
| " | 1907 | Über das Schweben der Raubvögel.
Pflügers Arch.f.d.ges.Physiol. 117 |
| ELSÄSSER, T. | 1925 | Die Struktur schillernder Federn.
Journal für Ornithologie. Bd.73 337-389 |

- FEHRINGER, O. 1912 Untersuchungen über die Anordnungsverhältnisse der Vogelfedern, besonders der Fadenfedern.
Zool.Jahrbuch.Abt.f.System. 33
- FISCHER, M.H. 1930 Der Flug der Wirbeltiere in:
Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Bd.15.1.Berlin
- FRANK, F. 1939 Die Färbung der Vogelfeder durch Pigment und Struktur.
Journal f. Ornithologie.87.Jahrg. 426-523
- FRANKE, H. 1959 Lexikon der Physik.
Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart
- FRAPS, R.M. u. 1936 Developmental analysis in plumage.
JUHN, M. II. Plumage configurations and the mechanism of feather development.
Phys. Zool., 9.319-378
- " 1936 Developmental analysis in plumage.
III. Field functions in the breast tracts.
Ibid., 378-408
- FRIELING, H. 1936 Das Federkleid.
Zeitschrift für Kleintierkunde. XII. Jahrgang. Heft 4
- " 1936 Die Feder.
Zeitschrift der Kleintierkunde. XII. Jahrgang. Heft 2
- GRAHAM, R. 1934 The silent flight of owls.
Journ. of the Royal Aeronaut. Soc.Vol.38. 837-863
- GRASSE, P. 1950 Traite de Zoologie.Oiseaux, Tome XV
- GREENEWALT, C.H. 1962 Dimensional relationships for flying animals.
Smithson.Misc.Coll.,144(2)1-46
- GREITE, W. 1931 Über Bildung und Lagerung der Melanine in der Vogelfeder.
Zool.Anz. 96. 41-49
- " 1934 Die Strukturbildung der Vogelfeder und ihre Pigmentierung durch Melanine.
Zeitschrift f.wiss.Zoologie. 145.283-336
- GROEBBELS, F. Der Bauplan des Vogels und das Flugproblem.
Pflügers Archiv f.d.ges.Physiologie d.Menschen u. d.Tiere Bd.212, 2.Heft

- HARDESTY, M. 1933 The feather of the guinea fowl and a mathematical theory of individual feather patterns.
Jour.Exp.Zool., 66:53-87
- HARTMANN, F.A. 1961 Locomotor mechanisms of birds.
Smithson. Misc.Coll., Vol. 143,
No.1, City of Washington.
Published by the Smithsonian
Institution, Publication 4460
- HEIM, P. 1951 Die schalldämpfenden Faktoren bei den Strigiformes.
Ber.Schwyz.naturf.Ges.Nr.4 63-65
- HEMPEL, M. 1931 Die Abhängigkeit der Federstruktur von der Körperregion, untersucht an *Xantholaema rubicapilla*.
Jen.Zeitschr.f.Naturwissenschaft.
Bd.65.97-114
- HERTEL, H. 1963 Struktur, Form, Bewegung.
Biologie und Technik. Krausskopf-V.
Mainz
- " 1965 Die Natur als Lehrmeisterin der Technik.
Naturwissenschaft und Medizin. n + m.
Nr. 9.2. Jahrgang
- HOLST, E.v. 1943 Über künstliche Vögel als Mittel zum Studium des Vogelfluges.
Journ. f.Ornithologie, Bd. 91
Heft 4, S. 406-447
- JUHN, M. u. 1936 Developmental Analysis in Plumage.
FRAPS, R.M. I. The individual feather: methods.
Physiolog. Zool. Vol. IX, No.3.
- " 1934 Pattern analysis in plumage.
I. Curve of barb growth. II. Methods of definitive feather analysis.
III. Action of thyroxin in high concentrations. IV. Order of asymmetry in the breast tracts.
Proc.Soc.Exp.Biol.and Med., 31:1181-90
- JUHN, M. 1933 Individual feather succession in the hybrid capon.
Proc. Soc.Exp.Biol. and Med.
30:1264-66
- KOECKE, H.U. 1964 Die Haut der Wirbeltiere, ihr Bau und ihre Funktionen.
- KOHLRAUSCH, F. 1960 Praktische Physik.
B.G. Teubner Verlagsgesellschaft
Stuttgart

- | | | |
|--------------------------------|---------------|--|
| KÜKENTHAL-
KRUMBACH | 1927-
1934 | Handbuch der Zoologie. Aves: Sauropsida.
Bd. VII. 2. Hälfte. Berlin u. Leipzig |
| LILLIE, F.R. u.
JUHNS, M. | 1932 | The physiology of development of
feathers. I. Growth-rate and
pattern in the individual feather.
Physiol. Zool., 5:124-184 |
| LORENZ, K. | 1933 | Beobachtetes über das Fliegen der
Vögel.
Journ. f. Ornithologie. Bd. 81
S. 107-236 |
| " | 1933 | Fliegen mit dem Wind und gegen den
Wind.
Journ. f. Ornith. Bd. 81 S. 596-607 |
| LÜDICKE, M. | 1964 | Das Integument der Vögel.
Studium Generale. Heft 6. 17. Jahrg. |
| MASCHA, E. | 1904 | Über den Bau der Schwungfedern.
Zeitschrift f. wissenschaftl. Zoologie
77. 606-651 |
| " | 1903 | Über den Bau der Schwungfedern.
Zool. Anzeiger. Bd. 26 142-150 |
| MARSHALL, W. | 1895 | Der Bau der Vögel. Leipzig |
| NAUMANN | | Naturgeschichte der Vögel Mittel-
europas. Bd. V |
| NEUHAUS, W. u.
BRETTING, H. | 1973 | Morphologische und funktionelle
Untersuchungen über den "lautlosen"
Flug der Eulen (<i>Strix aluco</i>) im
Vergleich zum Flug der Enten
(<i>Anas platyrhynchos</i>)
Biologisches Zentralblatt, Bd. 92
Heft 4 Seite 495-512 |
| NITZSCH, Ch. L. | 1840 | System der Pterylographie. Halle |
| PORTMANN, A. | 1948 | Einführung in die vergleichende
Morphologie der Wirbeltiere. |
| RASPET, A. | 1961 | Biophysics of birdflight.
Report for 1960 from the Smithsonian.
Publication 4447. Smithsonian Instit. |
| RENSCH, B. | 1925 | Untersuchungen über die Phylogenese
der Schillerstruktur.
Journal f. Ornithologie. Bd. 73.
127-147 |
| " | 1923 | Über Samt- und Seidenstruktur der
Vogelfedern.
Journal f. Ornithologie.
Bd. 71 |

- ROMEIS, B. Taschenbuch der mikroskop. Technik
- RUTSCHKE, E. 1965 Über den Silberschimmer aus den Schwungfedern v. Seeschwalben. Journal f. Ornithologie. Heft 3. Bd. 106. 307-312
- " 1965 Beiträge zur Morphologie der Pinguinfeder. Zeitschrift f. Morphologie u. Ökologie der Tiere. Bd. 55. Heft 7
- " 1961 Feinstrukturen der Stützwänze von Klettervögeln. Journal f. Ornithologie. 102 Bd. 470-474
- " 1959 Strukturelle Besonderheiten der Schwimmvogelfeder. Journal f. Ornithologie. 100. Bd.
- SALGUES, R. 1937 Contributions nouvelles à la physiologie de la plume. Oiseau 7. 923-925
- SCHMIDT, W.J. 1951 Neuere Untersuchungen über Schillerfarben. Journal f. Ornithologie. 93. Bd.
- " 1961 Über luftführende Federstrahlen beim Blutfasan nebst Bemerkungen über Luftgehalt von Federn überhaupt. Journal f. Ornithologie. 102 Bd.
- SCHREYER-
RAMM
WAGNER 1961 Praktische Baustatik. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart
- SCHÜTT, K. 1936 Einführung in die Physik des Fliegens. Berlin-Charlottenburg
- SICK, H. 1937 Morphologisch-funktionelle Untersuchungen über die Feinstruktur der Vogelfeder. Journal f. Ornithologie. Bd. 85. 206-371
- SPÖTTTEL, W. 1914 Über die Farben der Vogelfedern. Zoologisches Jahrbuch. Abt. f. Anatomie. 38 357-426
- STOLPE, M. u.
ZIMMER, K. 1939 Der Vogelflug. Akad. Verlagsgesellsch. Leipzig
- STRESEMANN, E. 1961 Über Filament am längsten Schwanzfederpaar der Paradieswitwe. Journal f. Ornithologie. 102. Bd.

VILTER, V.

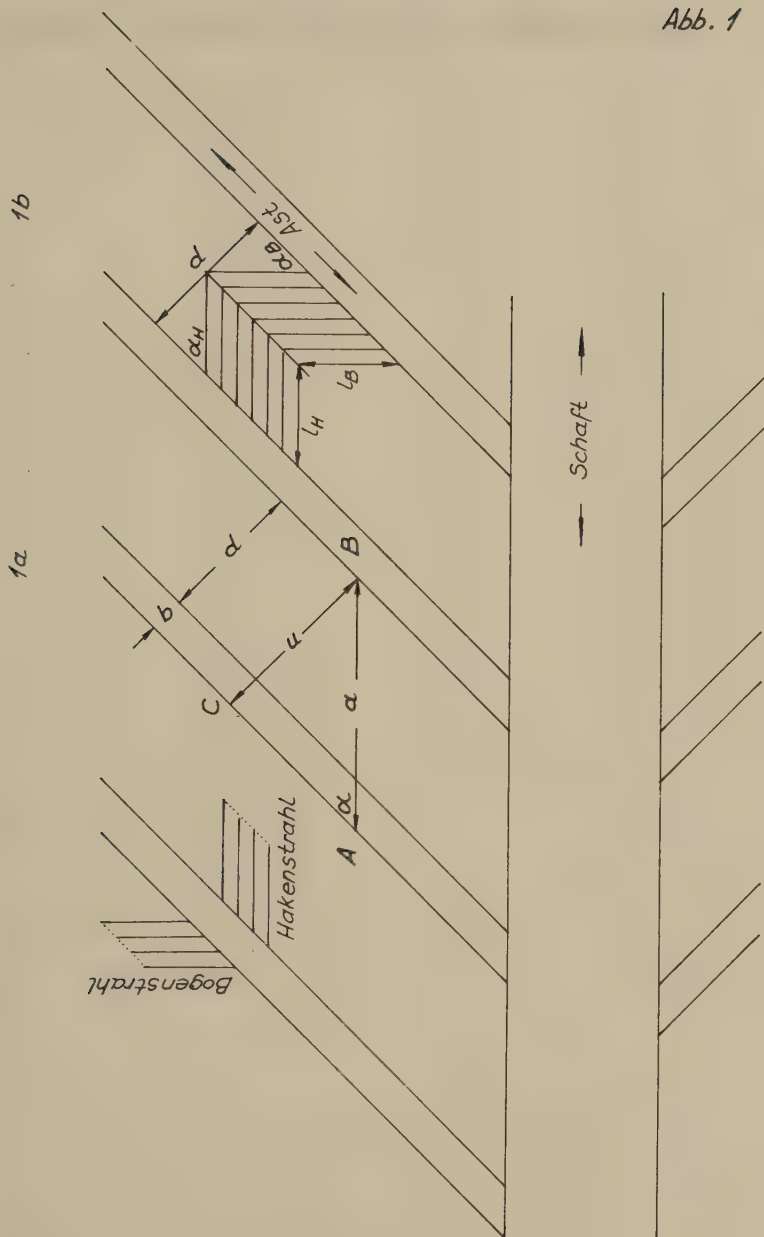
1935

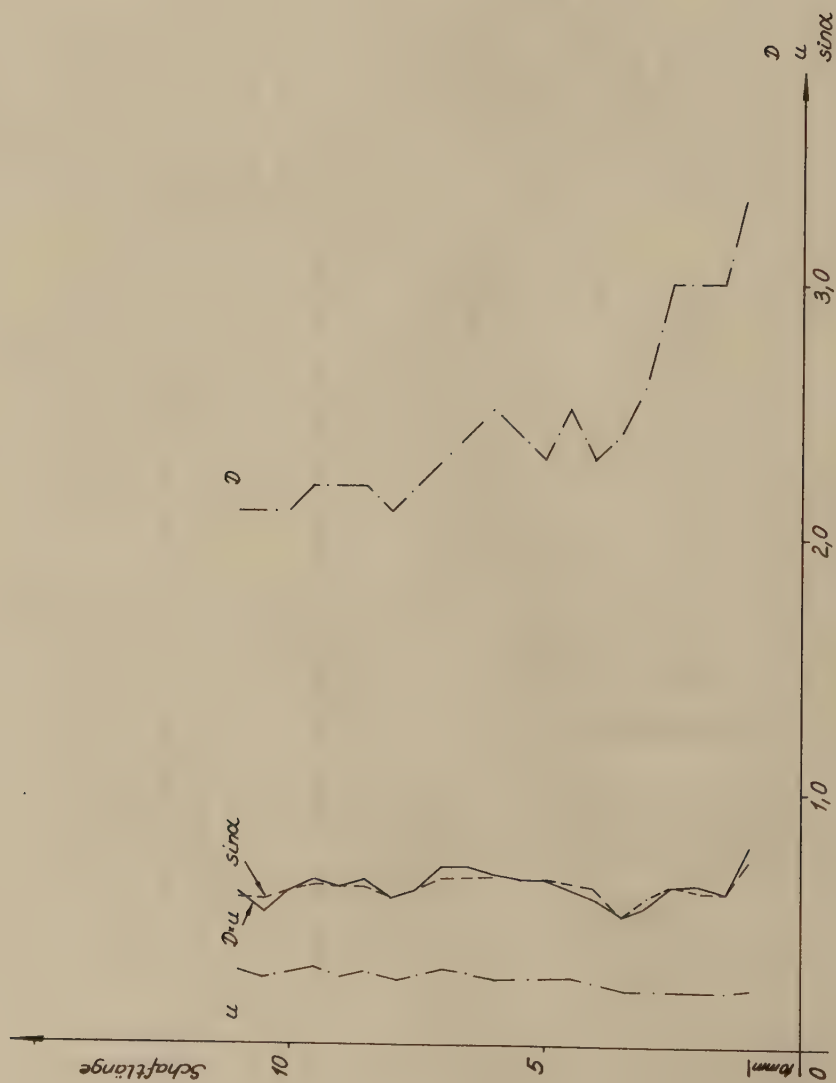
La formation de la plume et son
mécanisme histologique; XXXe
Reunion de l'Association des
Anatomistes. (p. 1-42)

Anmerkung:

Die geringe Zahl der Literaturhinweise mag überraschen.
Tatsächlich finden sich zum Hauptthema dieser Abhandlung
außer allgemein morphologischen Arbeiten kaum Hinweise.

Abb. 1



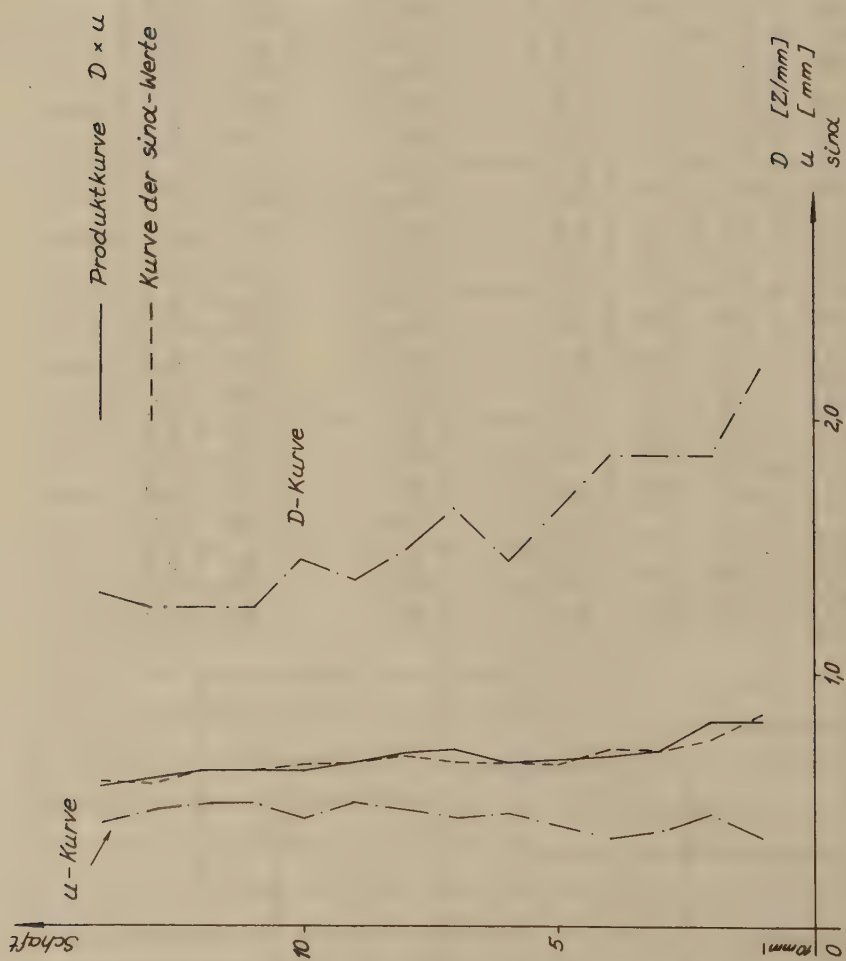


Turmfalke, 5. Handschwinge, Jf

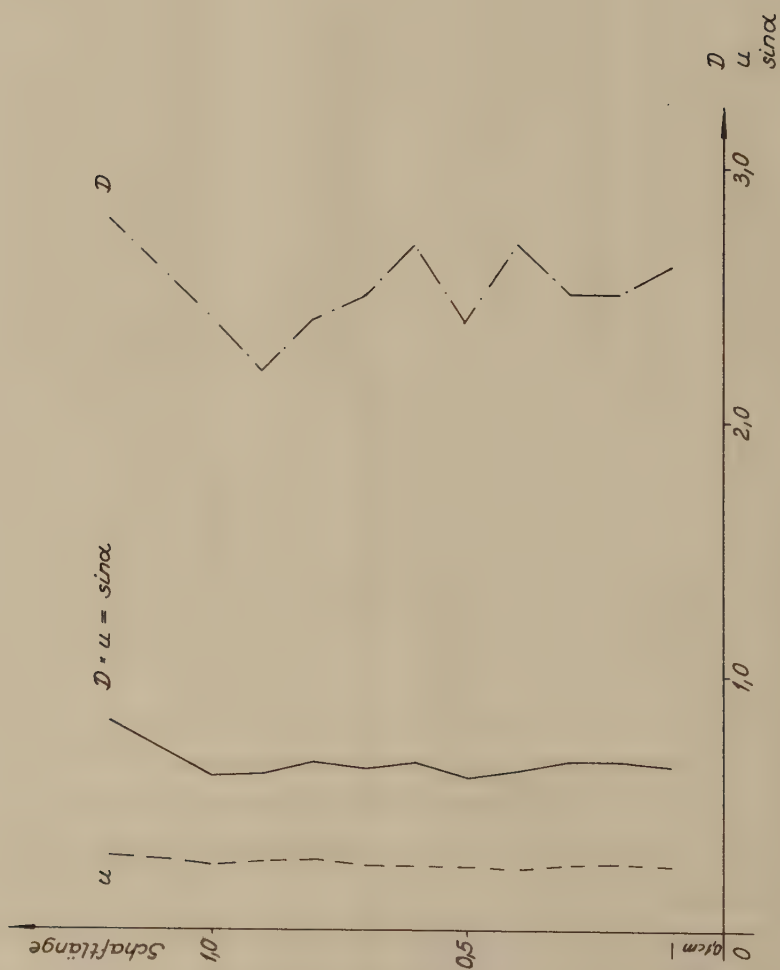
Tab. 2b

[illegible]

Mäusebussard, Handschwinge Nr. 6 Abb. 3
 Außenfahne



Schleiereule, Außenfahnenausschnitt Abb. 4



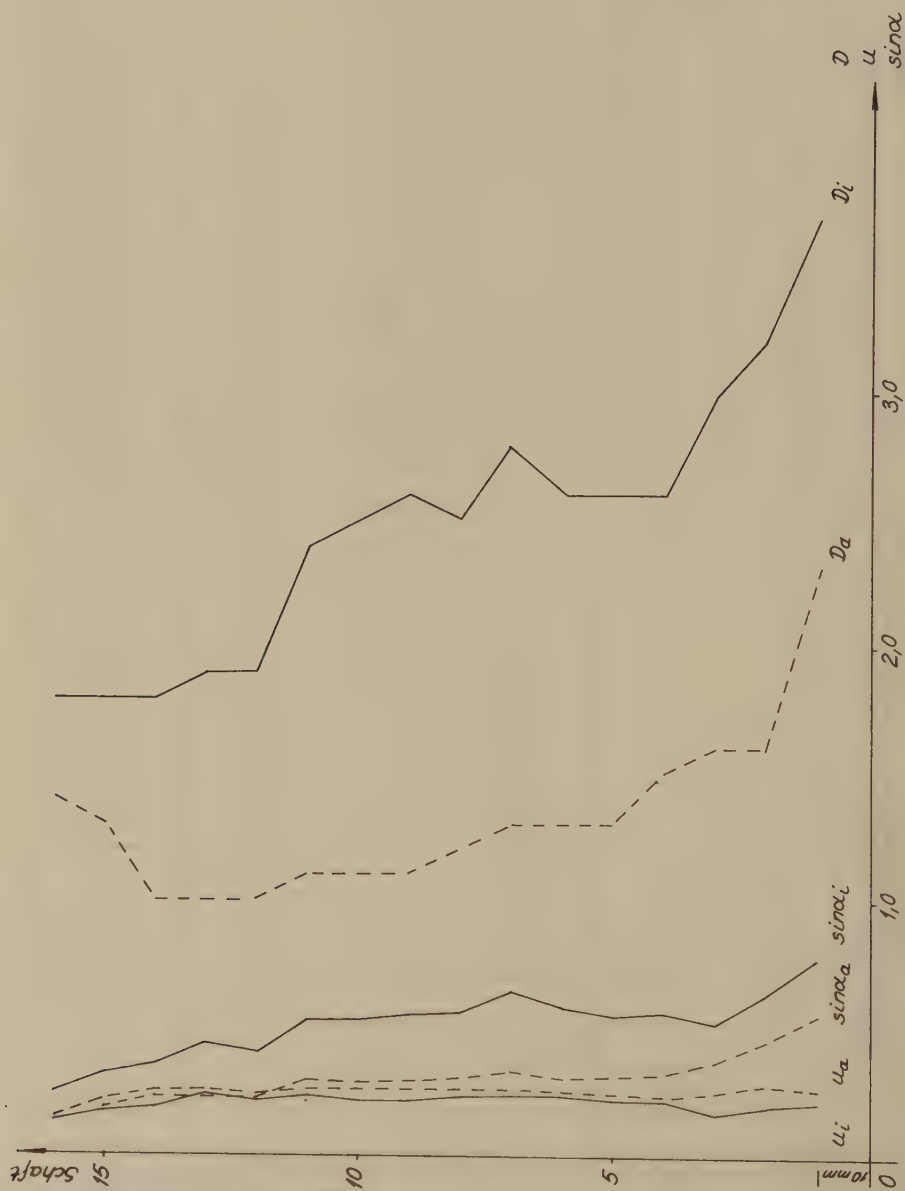
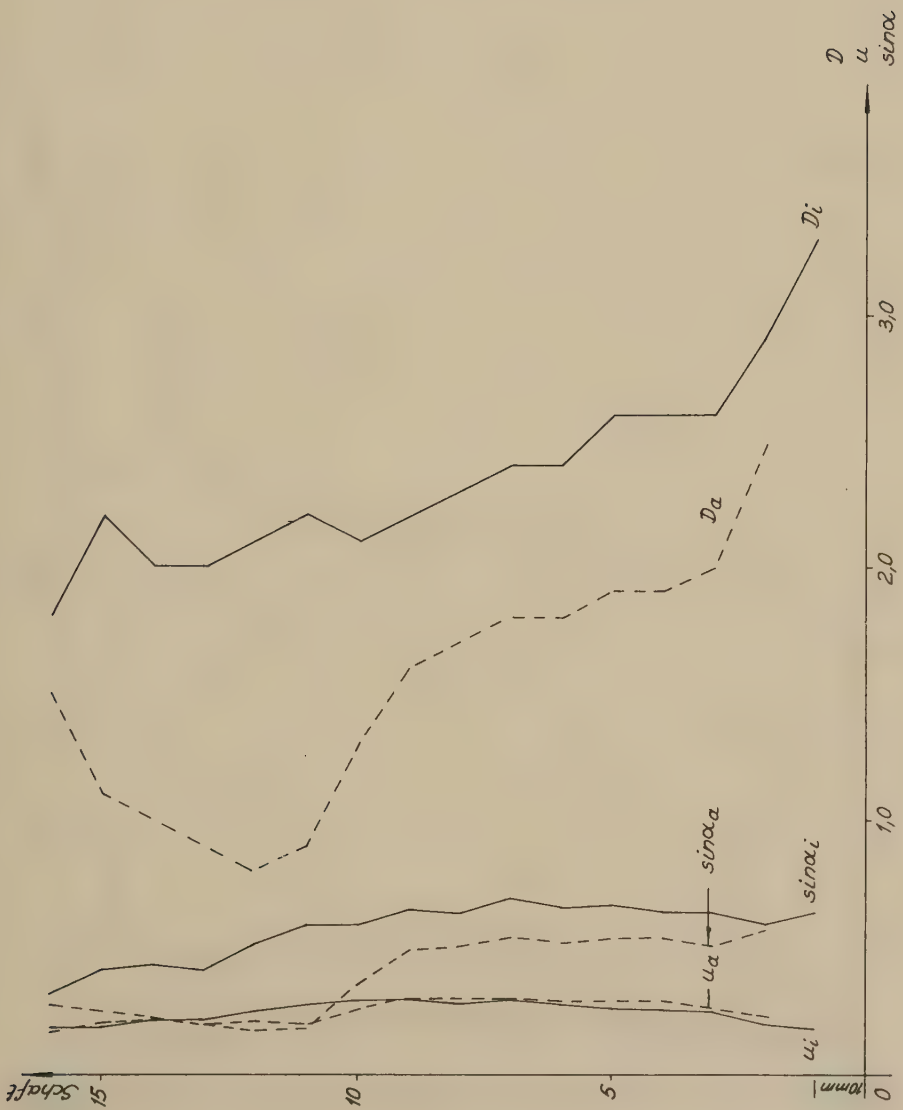
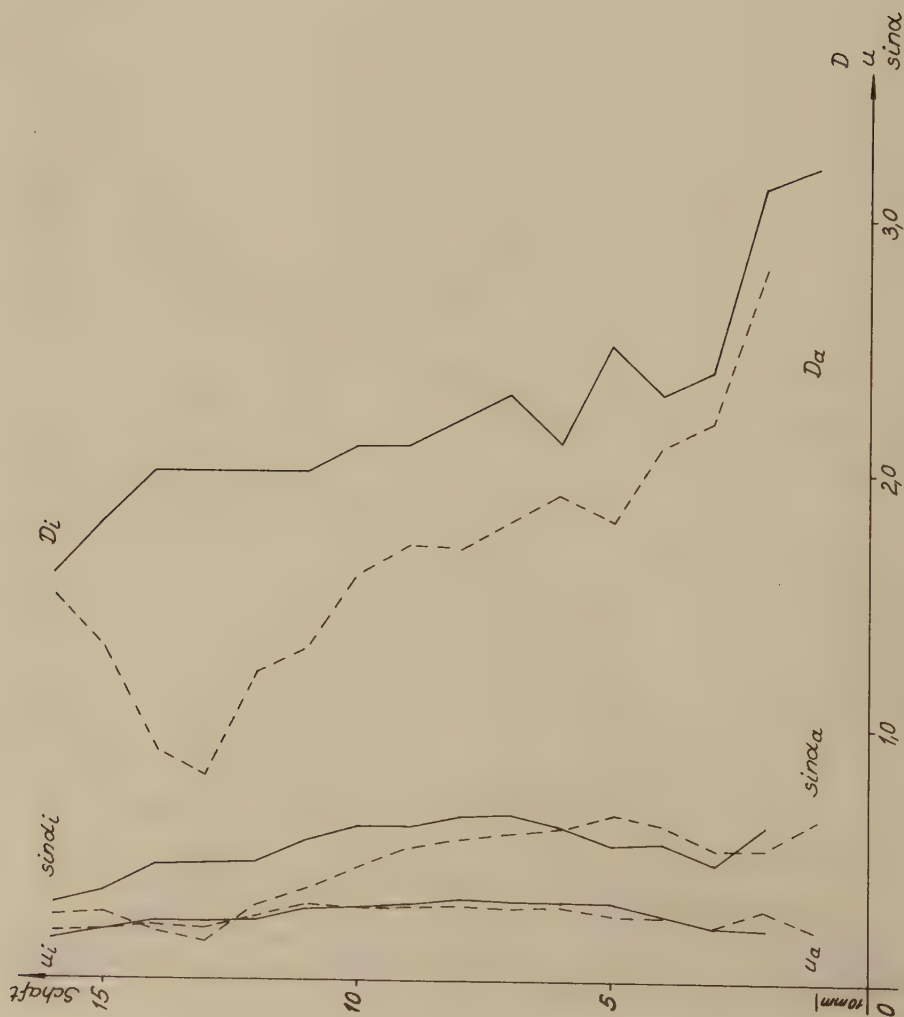


Abb. 6

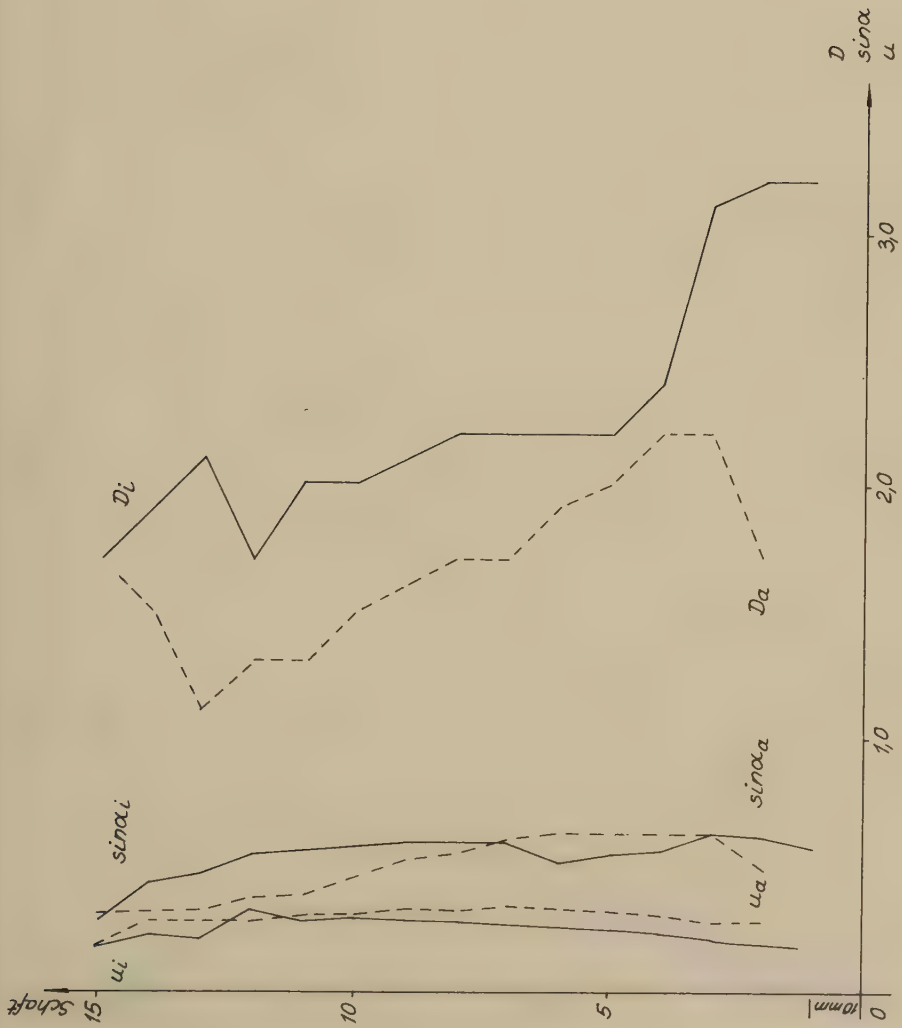
Turmfalke, 2. Handschwinge



Turmfalke, 3. Handschwinge



Turmfalke, 4. Handschwinge

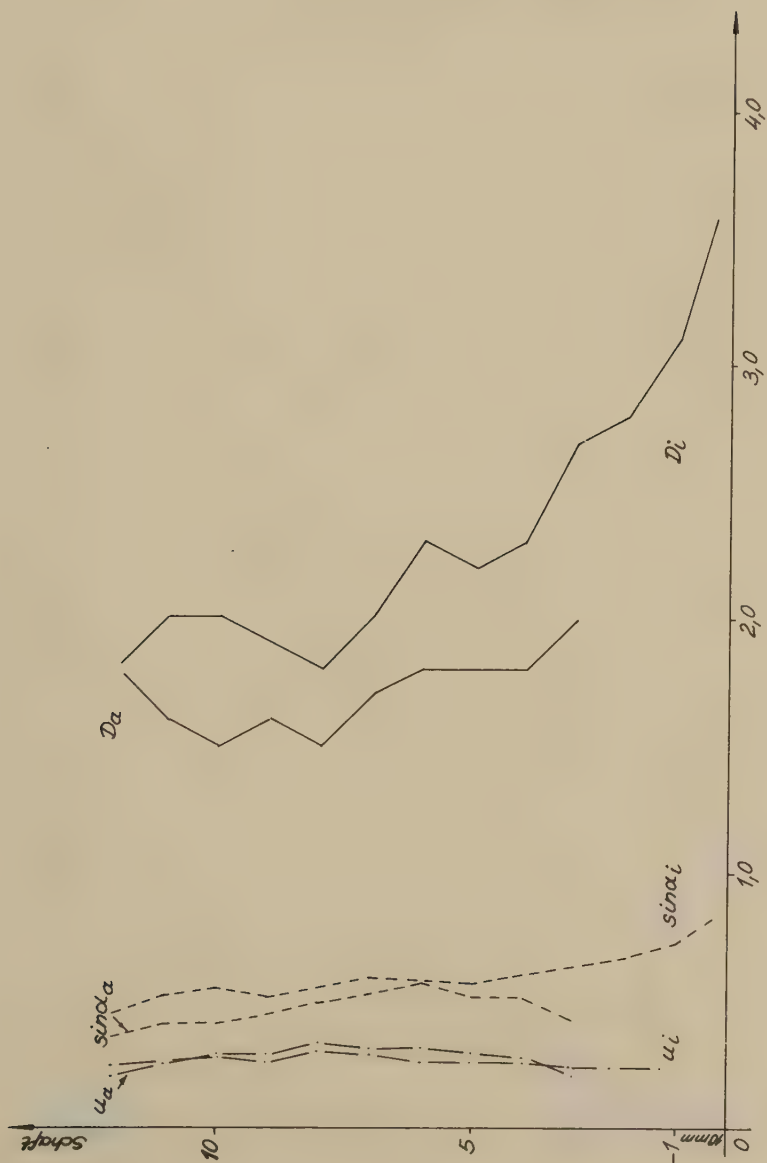


Turmfalke, 5. Handschwinge



Abb.10

Turmfalke, 6. Handschwinge, rechts



Turmfalke, 7. Handschwinge



Abb. 12

Turmfalke, 8. Handschwinge



Turmfalke, 7. Handschwinge



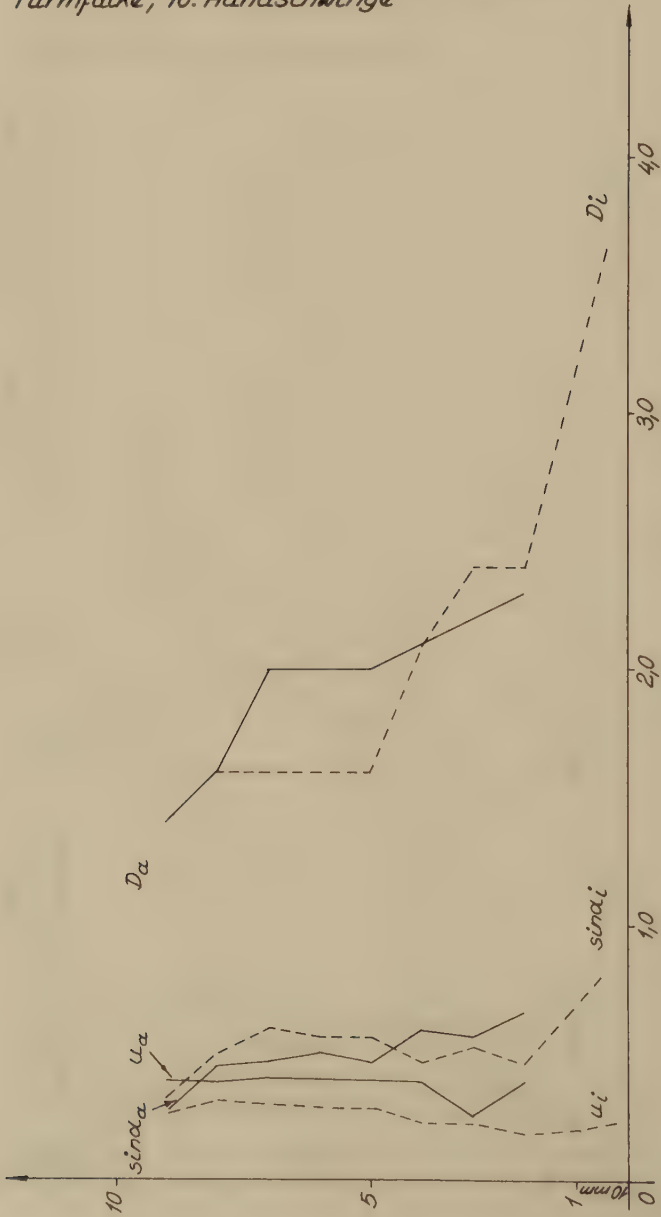
Abb. 12

Turmfalke, 8. Handschwinge



Abb. 13

Turmfalke, 10. Handschwinge



Turmfalke, 3. Armschwinge



Turmfalke, 6. Armschwinge



Abb. 16

Turmfalke, 9. Armschwinge

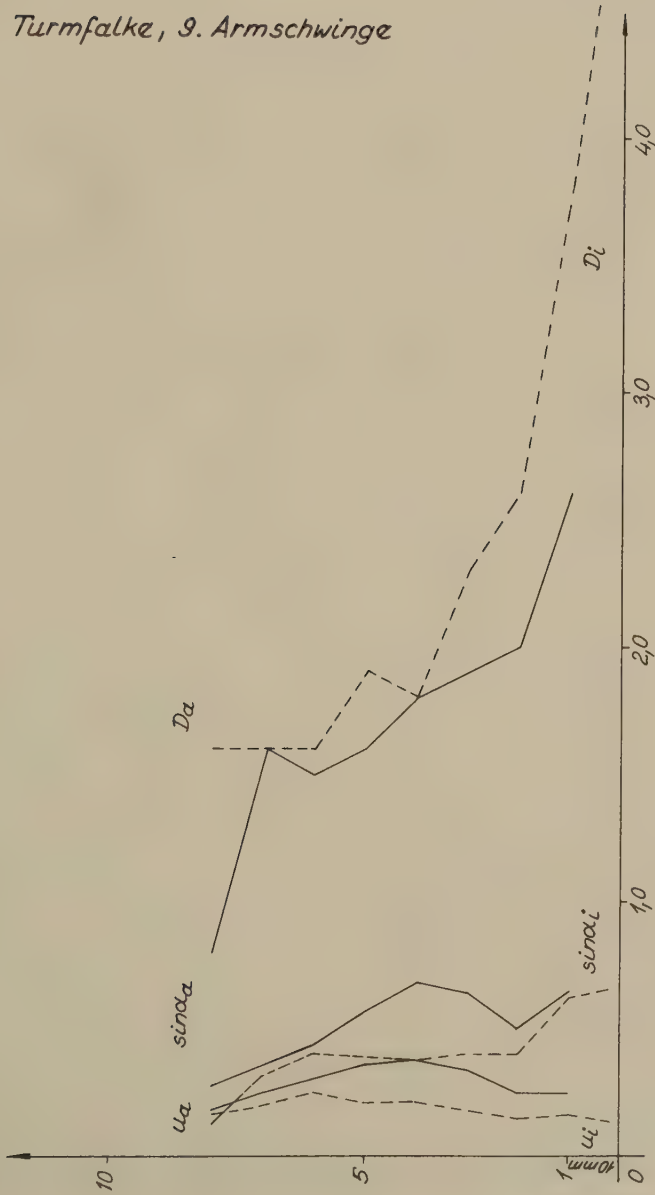


Abb. 17

Turmfalke, Flügel

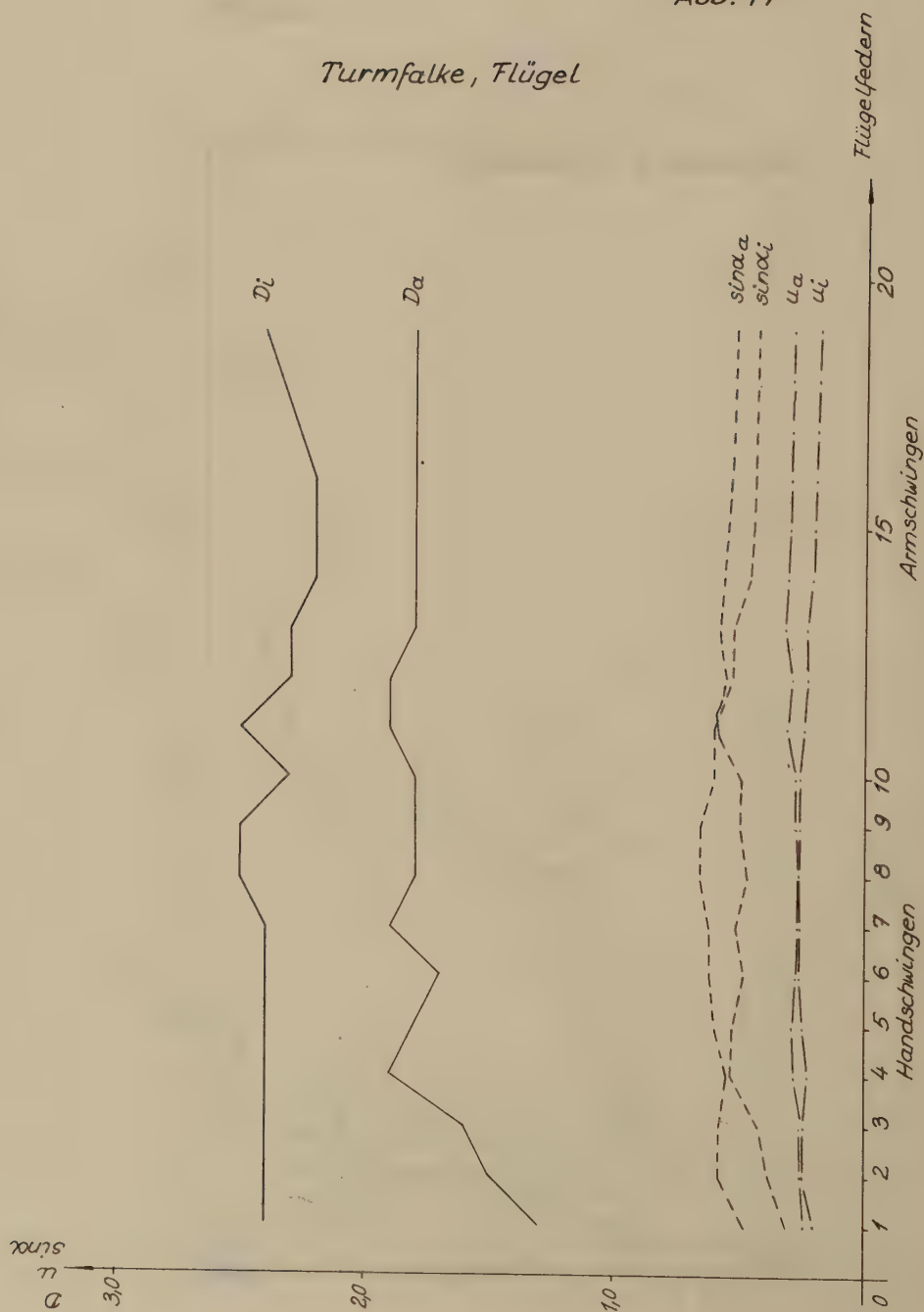


Abb. 13

1. Handschwinge

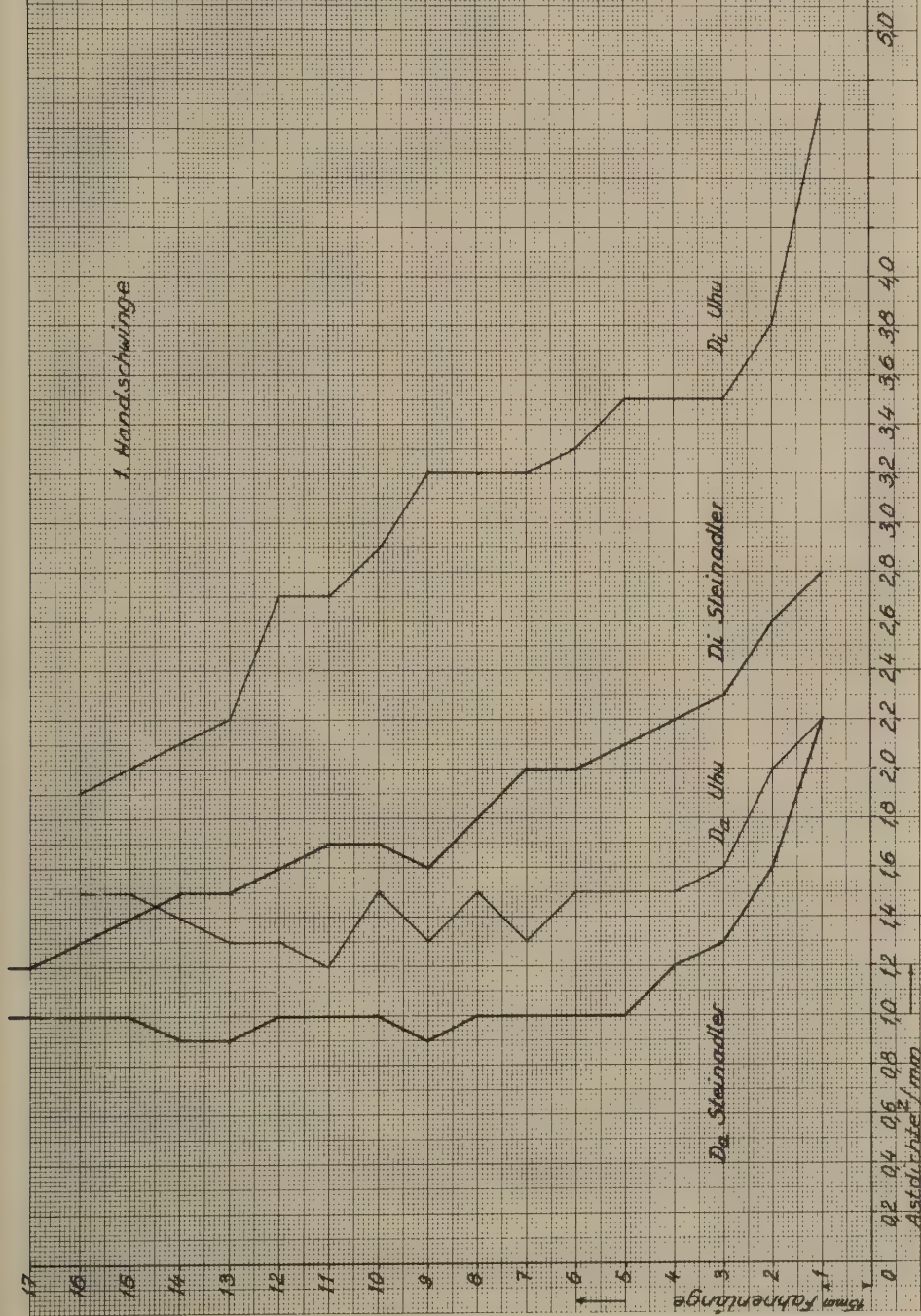


Abb. 19

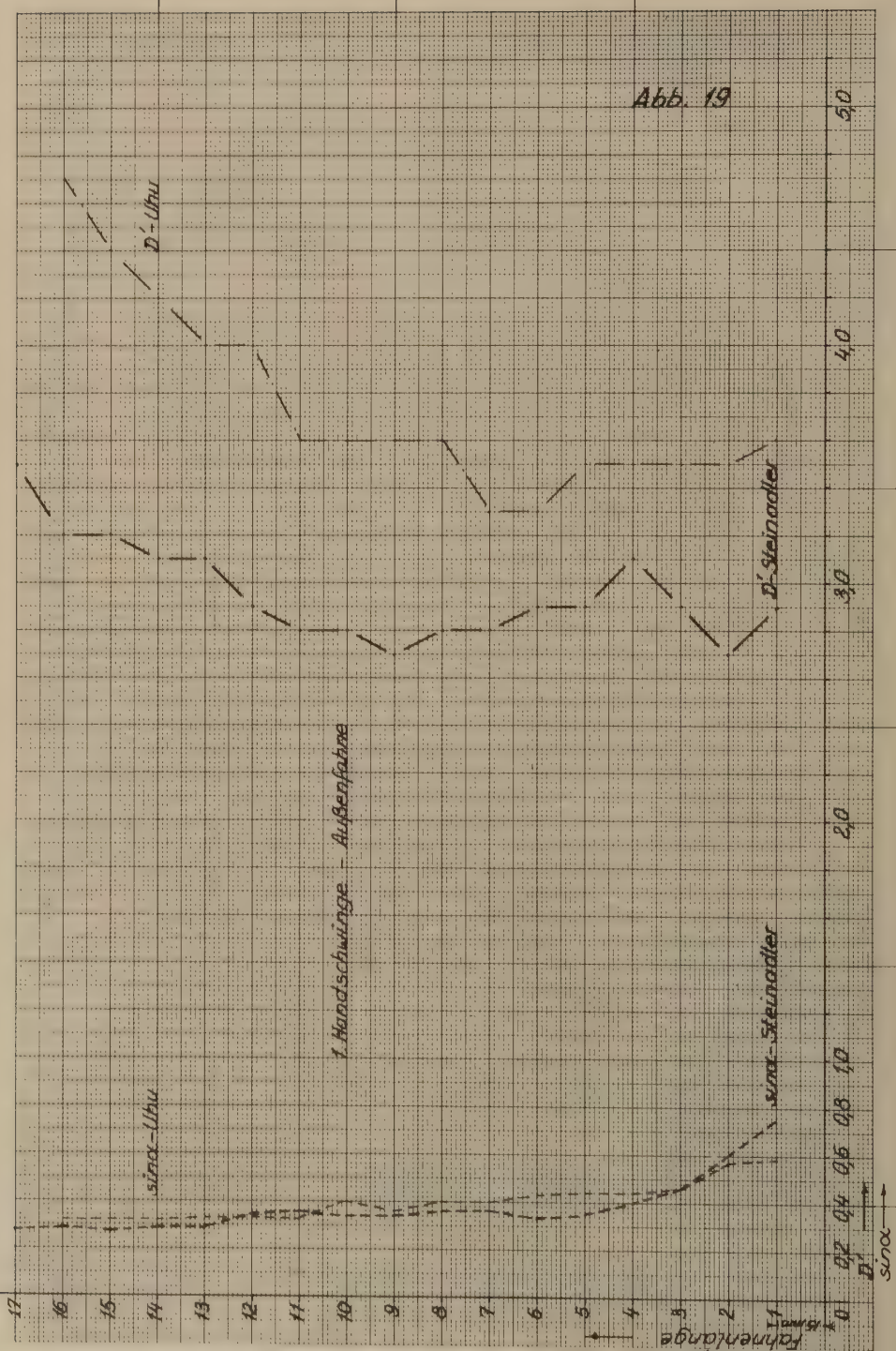


Abb. 20

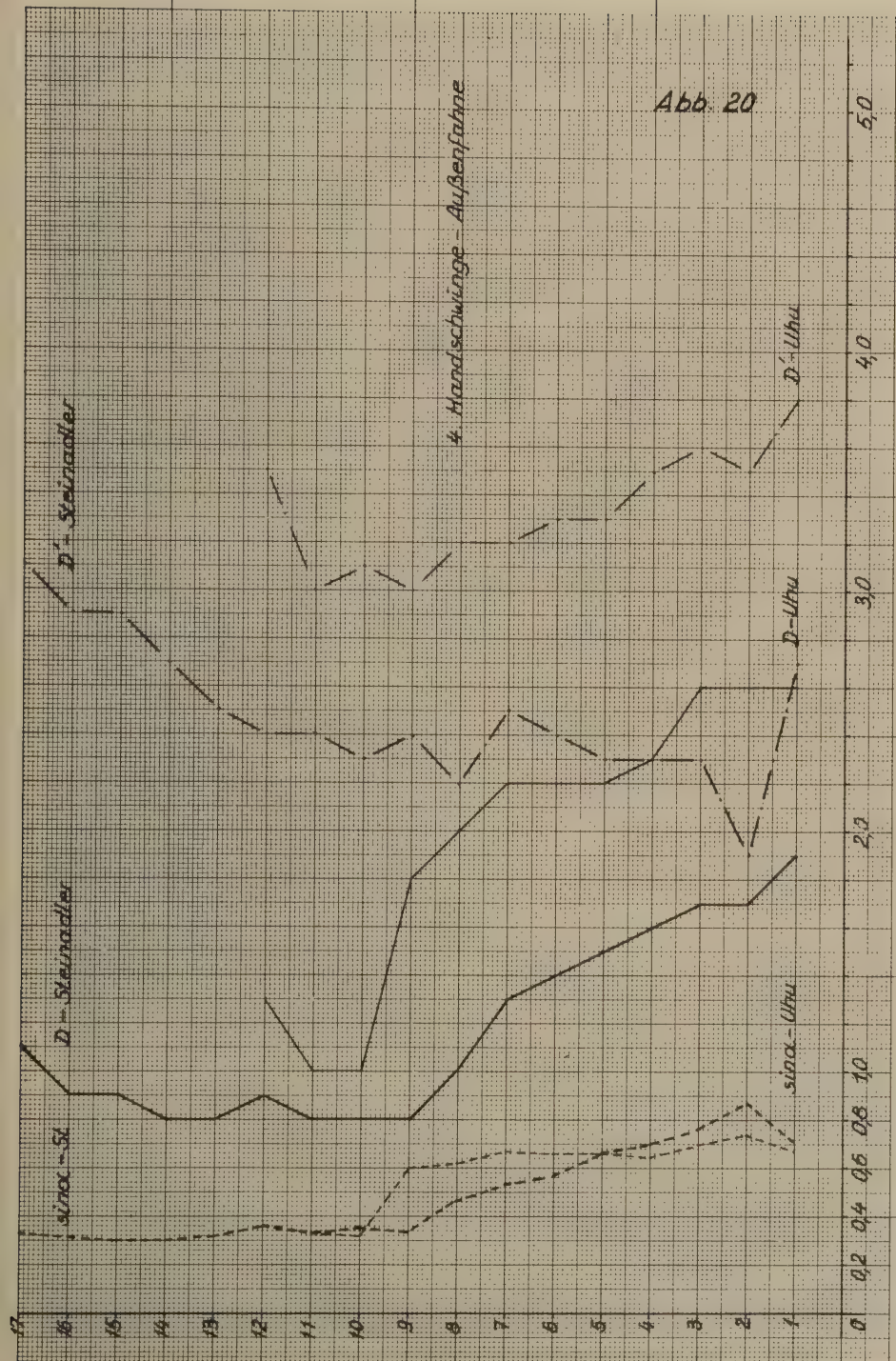


Abb. 21

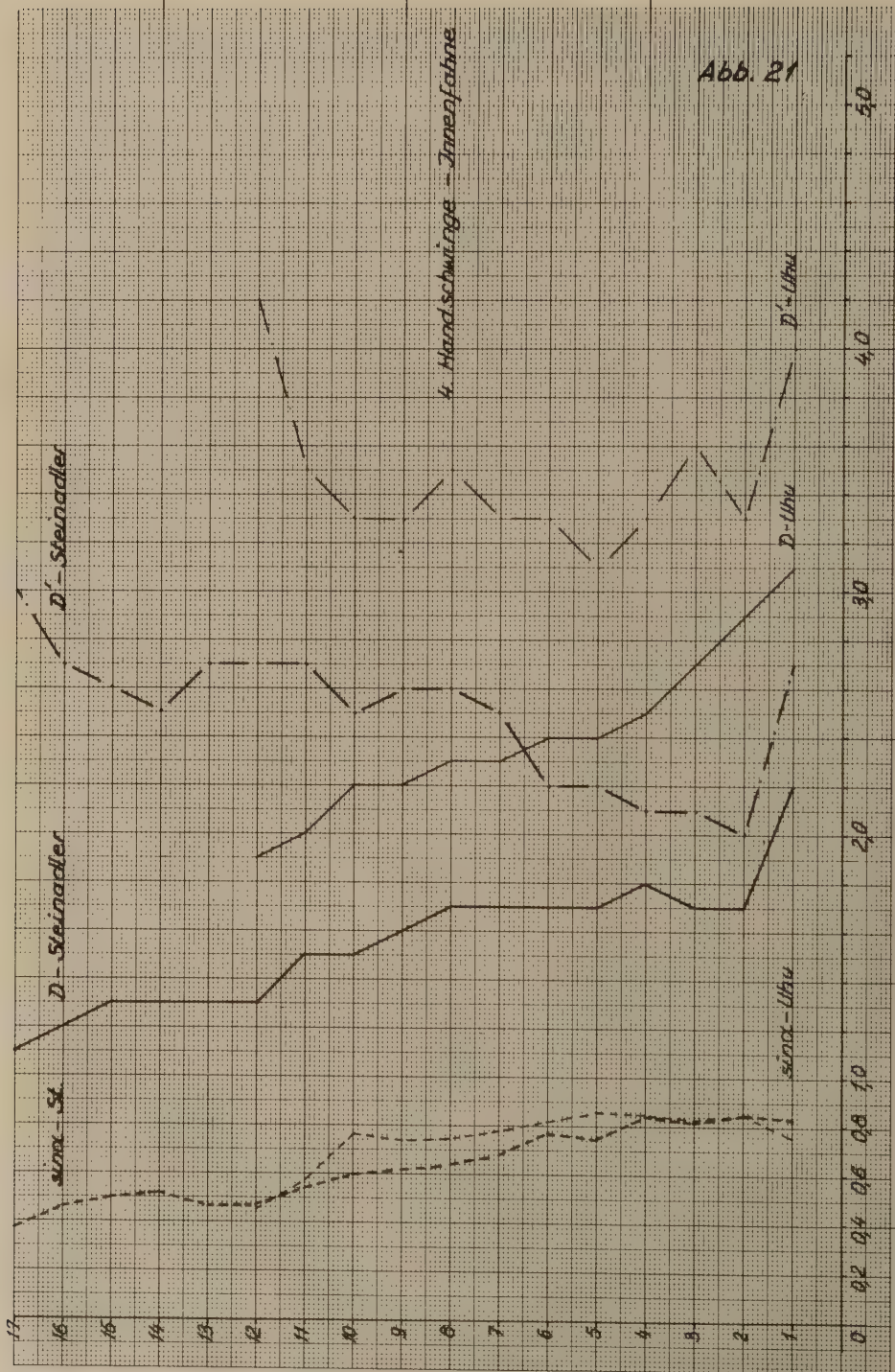
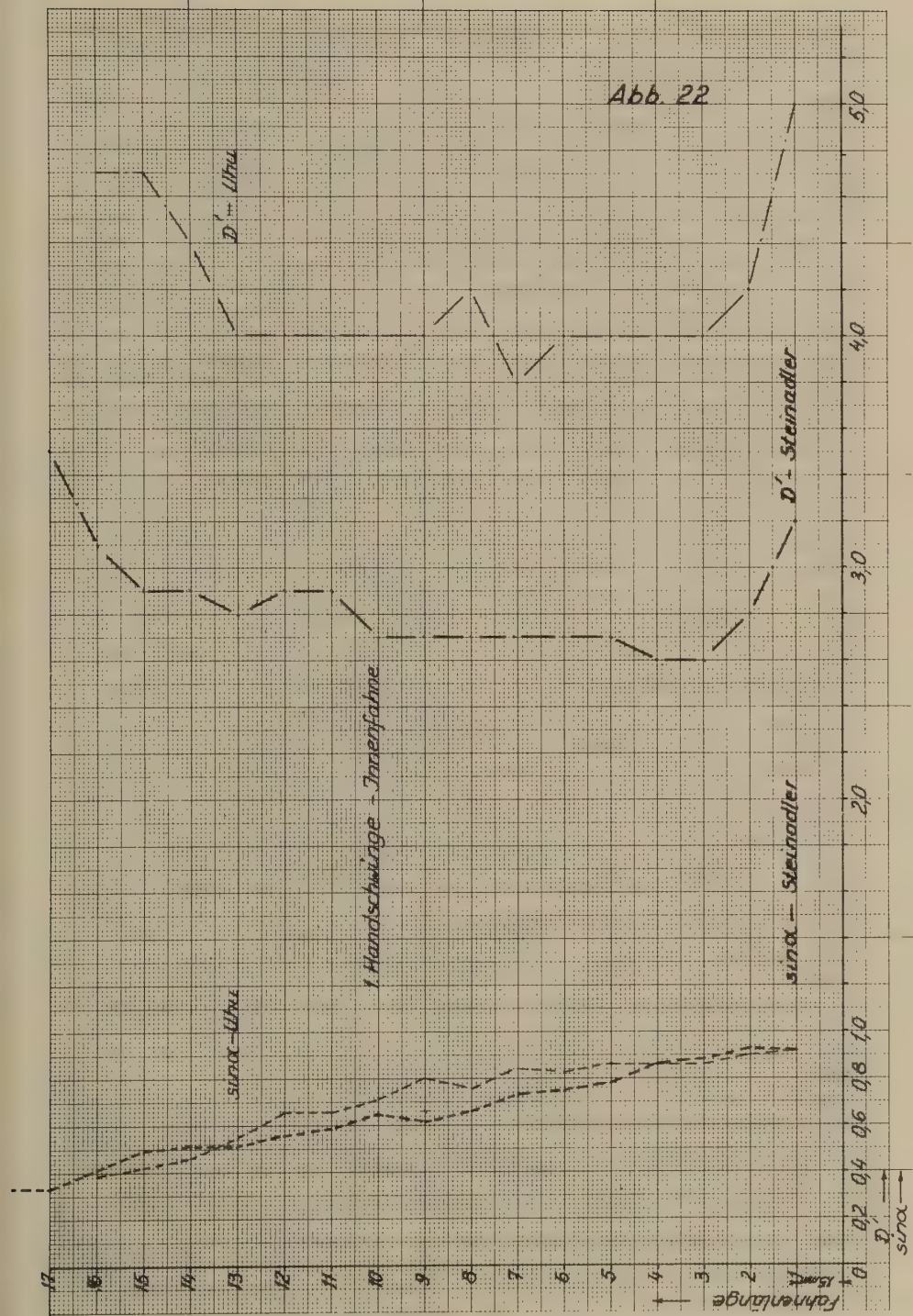


Abb. 22



Position

u_i sind i

u_a sind a

Bodenwassertiefe : 1 Handschwinge - rechts

D_i

D_a

Abb 26

50

40

30

20

10

0

0.2

0.4

0.6

0.8

1.0

1.2

1.4

1.6

1.8

2.0

2.2

2.4

2.6

2.8

3.0

3.2

3.4

3.6

3.8

4.0

4.2

4.4

4.6

4.8

5.0

5.2

5.4

5.6

5.8

6.0

6.2

6.4

6.6

6.8

7.0

7.2

7.4

7.6

7.8

8.0

8.2

8.4

8.6

8.8

9.0

9.2

9.4

9.6

9.8

10.0

10.2

10.4

10.6

10.8

11.0

11.2

11.4

11.6

11.8

12.0

12.2

12.4

12.6

12.8

13.0

13.2

13.4

13.6

13.8

14.0

14.2

14.4

14.6

14.8

15.0

15.2

15.4

15.6

15.8

16.0

16.2

16.4

16.6

16.8

17.0

17.2

17.4

17.6

17.8

18.0

18.2

18.4

18.6

18.8

19.0

19.2

19.4

19.6

19.8

20.0

20.2

20.4

20.6

20.8

21.0

21.2

21.4

21.6

21.8

22.0

22.2

22.4

22.6

22.8

23.0

23.2

23.4

23.6

23.8

24.0

24.2

24.4

24.6

24.8

25.0

25.2

25.4

25.6

25.8

26.0

26.2

26.4

26.6

26.8

27.0

27.2

27.4

27.6

27.8

28.0

28.2

28.4

28.6

28.8

29.0

29.2

29.4

29.6

29.8

30.0

30.2

30.4

30.6

30.8

31.0

31.2

31.4

31.6

31.8

32.0

32.2

32.4

32.6

32.8

33.0

33.2

33.4

33.6

33.8

34.0

34.2

34.4

34.6

34.8

35.0

35.2

35.4

35.6

35.8

36.0

36.2

36.4

36.6

36.8

37.0

37.2

37.4

37.6

37.8

38.0

38.2

38.4

38.6

38.8

39.0

39.2

39.4

39.6

39.8

40.0

40.2

40.4

40.6

40.8

41.0

41.2

41.4

41.6

41.8

42.0

42.2

42.4

42.6

42.8

43.0

43.2

43.4

43.6

43.8

44.0

44.2

44.4

44.6

44.8

45.0

45.2

45.4

45.6

45.8

46.0

46.2

46.4

46.6

46.8

47.0

47.2

47.4

47.6

47.8

48.0

48.2

48.4

48.6

48.8

49.0

49.2

49.4

49.6

49.8

50.0

50.2

50.4

50.6

50.8

51.0

51.2

51.4

51.6

51.8

52.0

52.2

52.4

52.6

52.8

53.0

53.2

53.4

53.6

53.8

54.0

54.2

Steinkauz - 1. Handschwinge

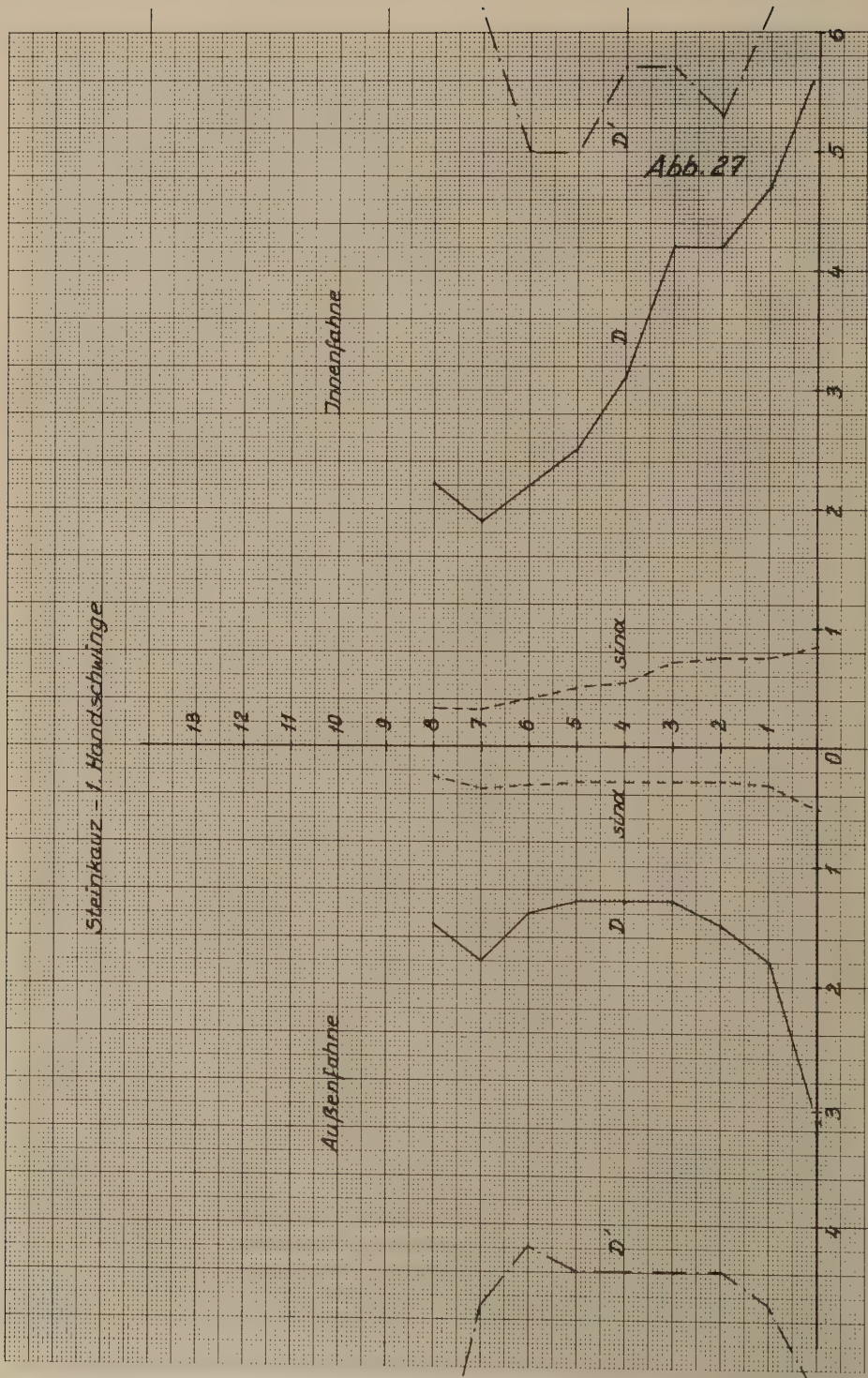
Außenfahne

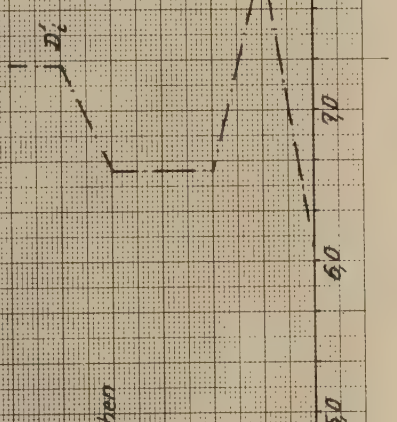
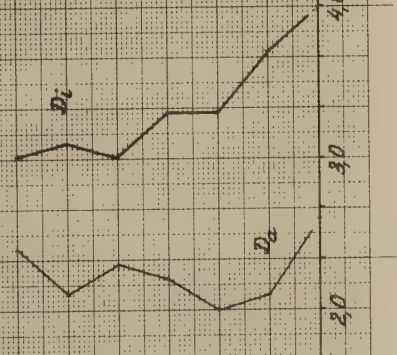
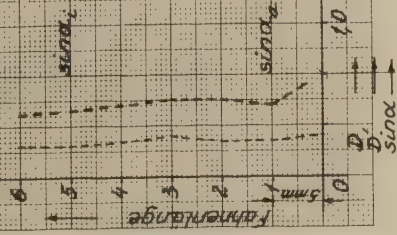
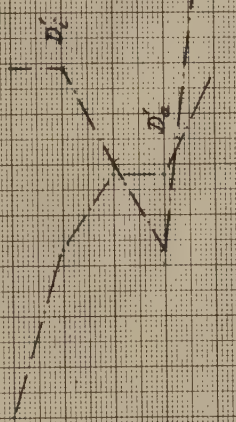
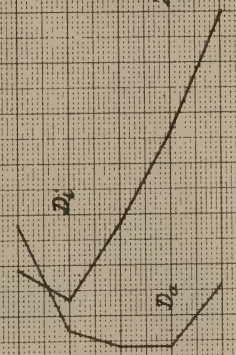
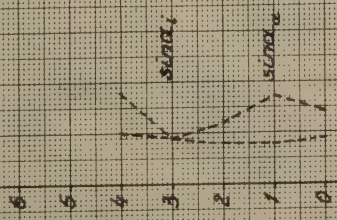
Innenfahne

stnd

stnd

Abb. 27



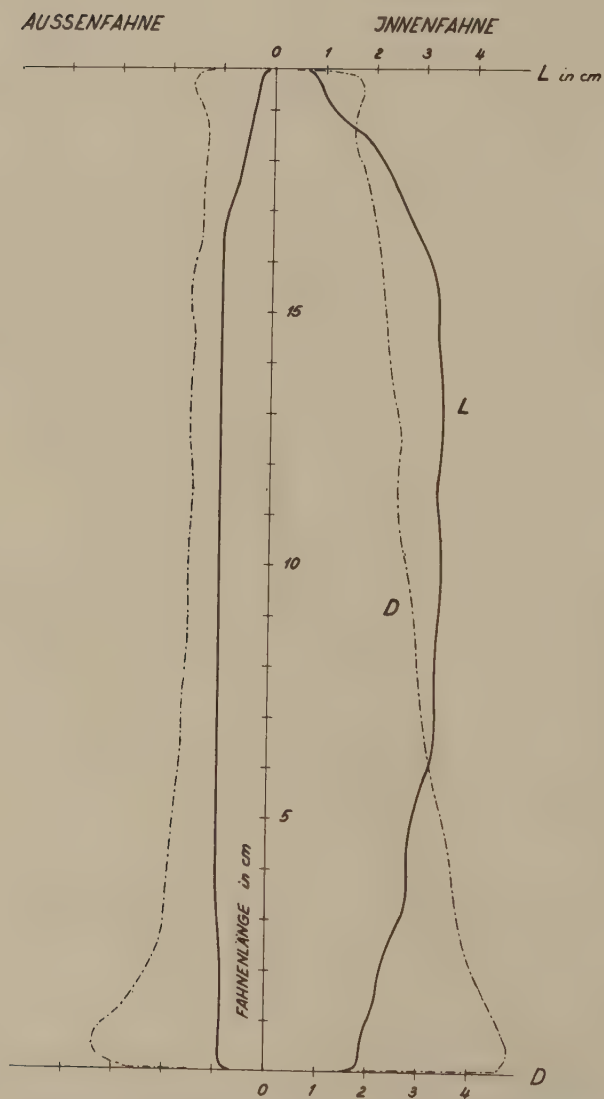


I. Handschwinge

Goldhähnchen

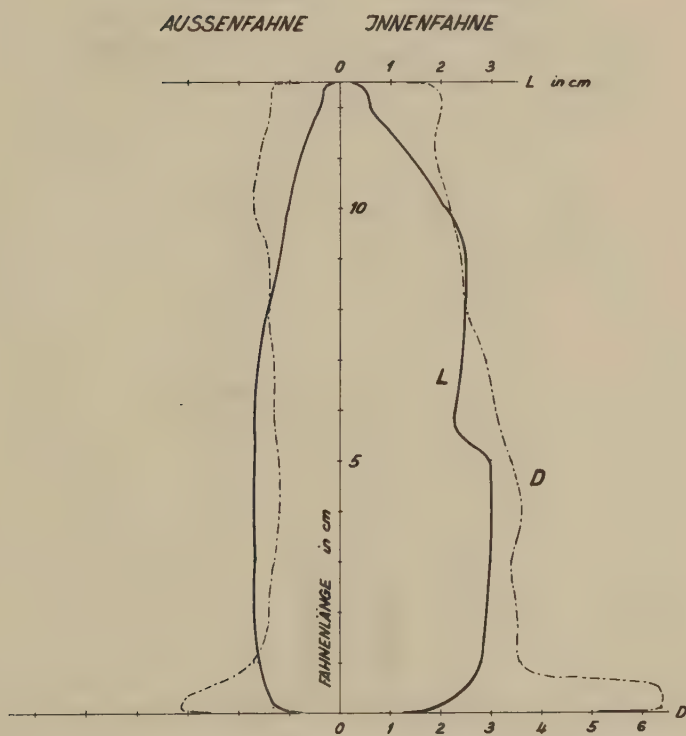
Abb. 28

SCHLEIEREULE (1. HANDSCHWINGE)



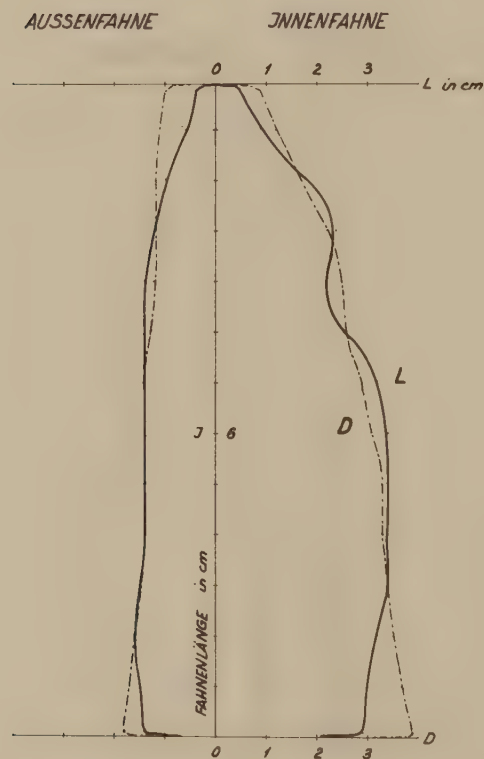
Vergleich von Dichte (D = Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge) und Länge (L) der Rami

WALDKAUZ (1. HANDSCHWINGE)



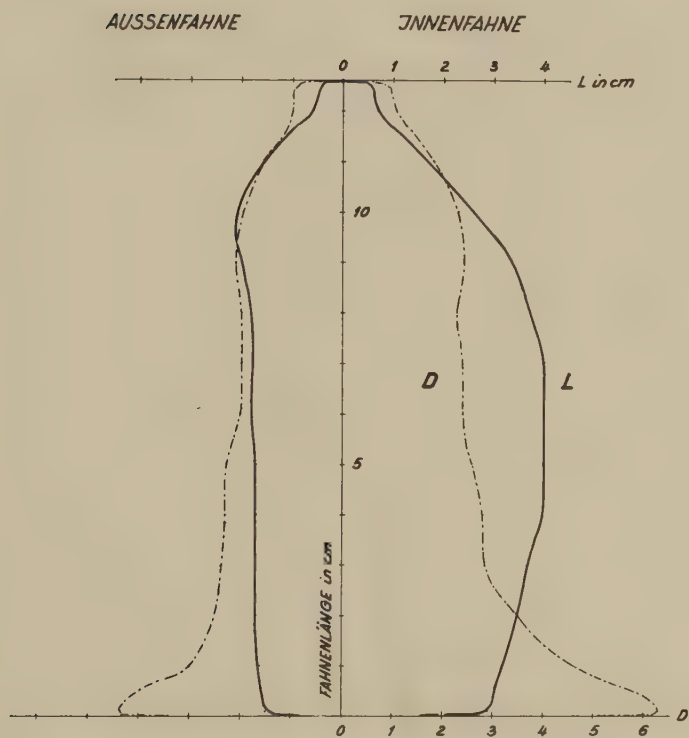
Vergleich von Dichte (D = Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge) und Länge der Rami

WALDOHREULE (1. HANDSCHWINGE)



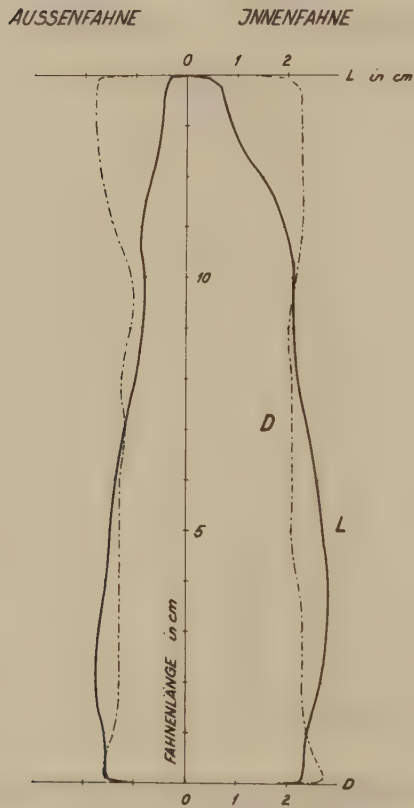
Vergleich von Dichte (D - Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge)
und Länge (L) der Rami

WALDOHREULE (7. HANDSCHWINGE)



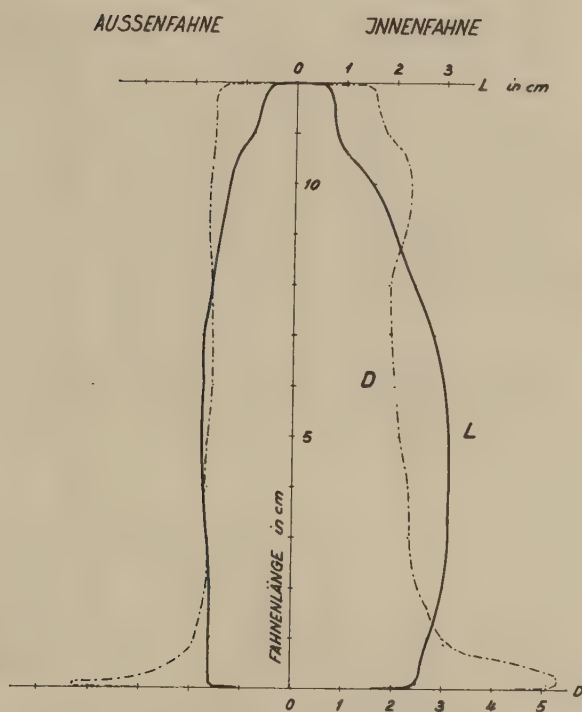
Vergleich von Dichte (D = Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge) und Länge (L) der Rami

STOCKENTE (1. HANDSCHWINGE)



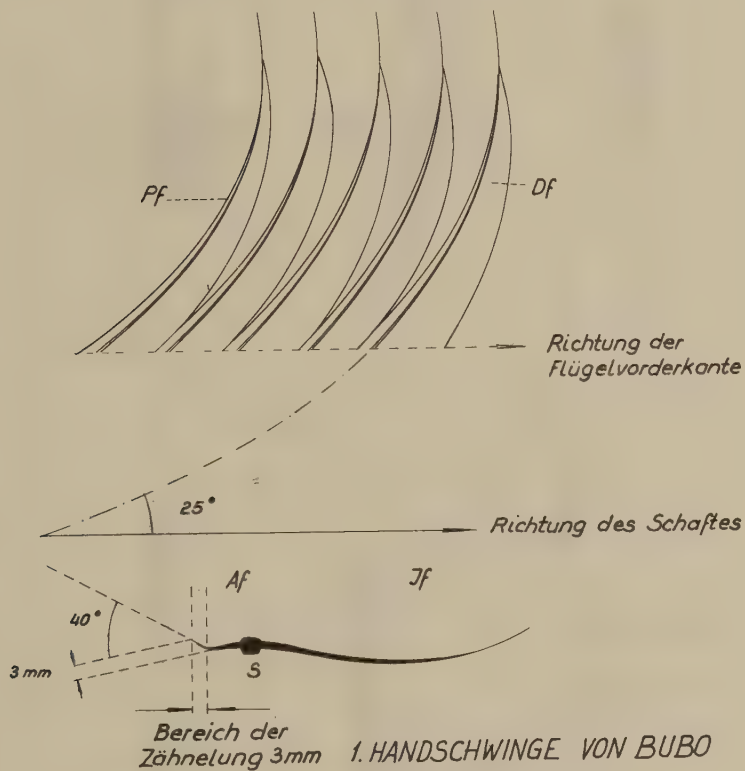
Vergleich von Dichte (D = Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge)
und Länge (L) der Rami.

STOCKENTE (7. HANDSCHWINGE)



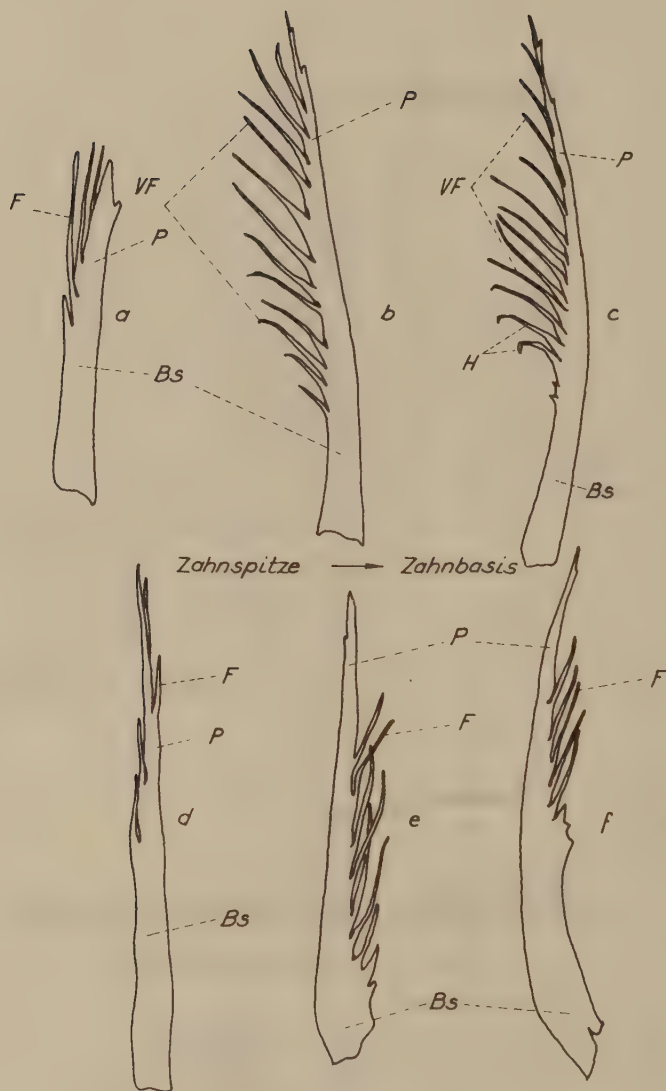
Vergleich von Dichte (D = Anzahl der Rami pro mm Schaftlänge)
und Länge (L) der Rami

WALDOHREULE (1. Handschwinge)



FAHNENQUERSCHNITT

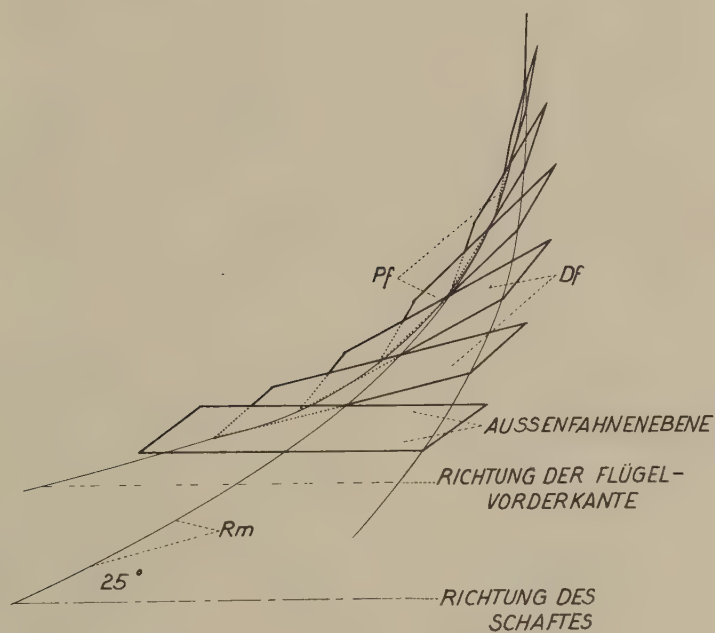
Af	Außenfahne
Jf	Innenfahne
S	Schaft



WALDOHREULE (1. HANDSCHWINGE)

Radialen eines Zahnes: a-c Distalradialen
d-f Proximalradialen

SCHEMA EINES RAMUSZAHNES



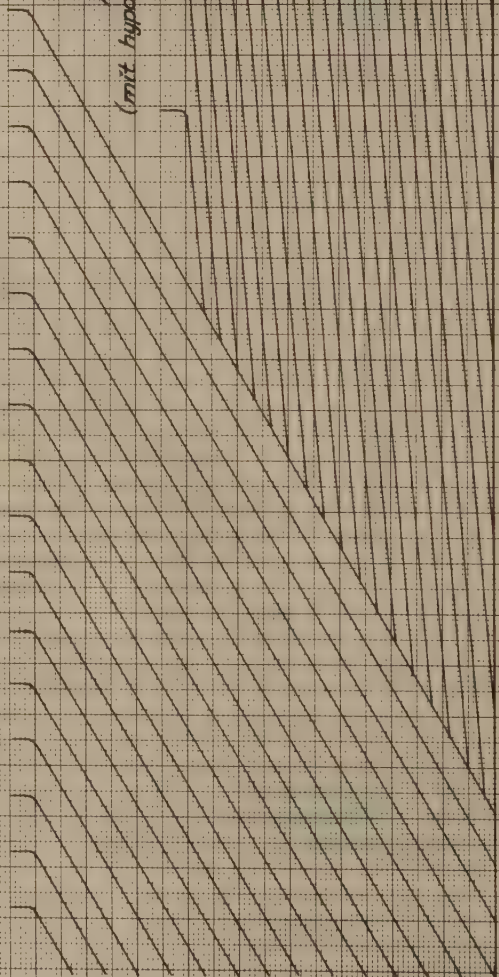
Df	Distalfahne
Pf	Proximalfahne
Rm	Ramus

Außenfahne der äußersten Handschwinge

Maßstab = 1 : 1/20

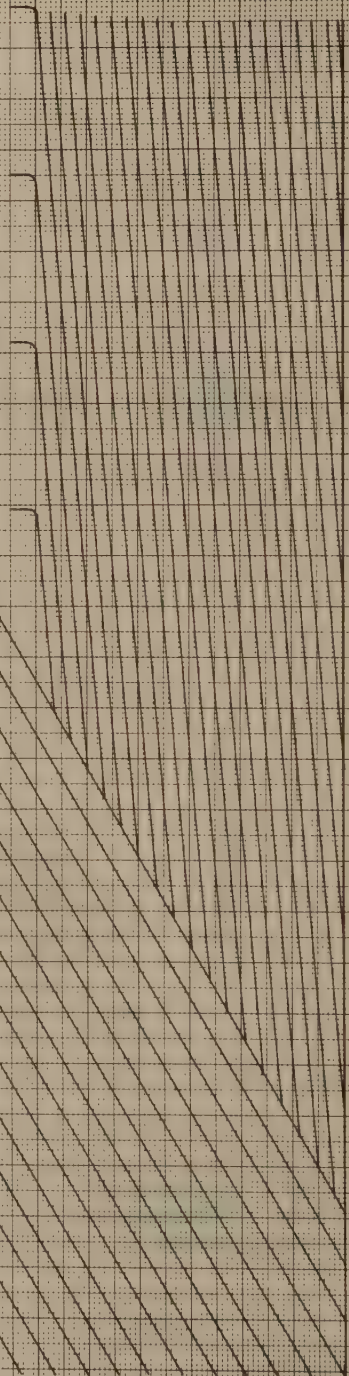
$D = 1,8$
 $D' = 3,5$
 $\alpha = 31^\circ$

Schleiereule



$D = 0,8$
 $D' = 1,0$
 $\alpha = 5^\circ$

Auerhahn
 (mit hypothetischen Asthaken)



Schafspitze

Abb. 40

1. Handsschwinge - Außenfahne (Ziegenmelker - Walsch Kautz)

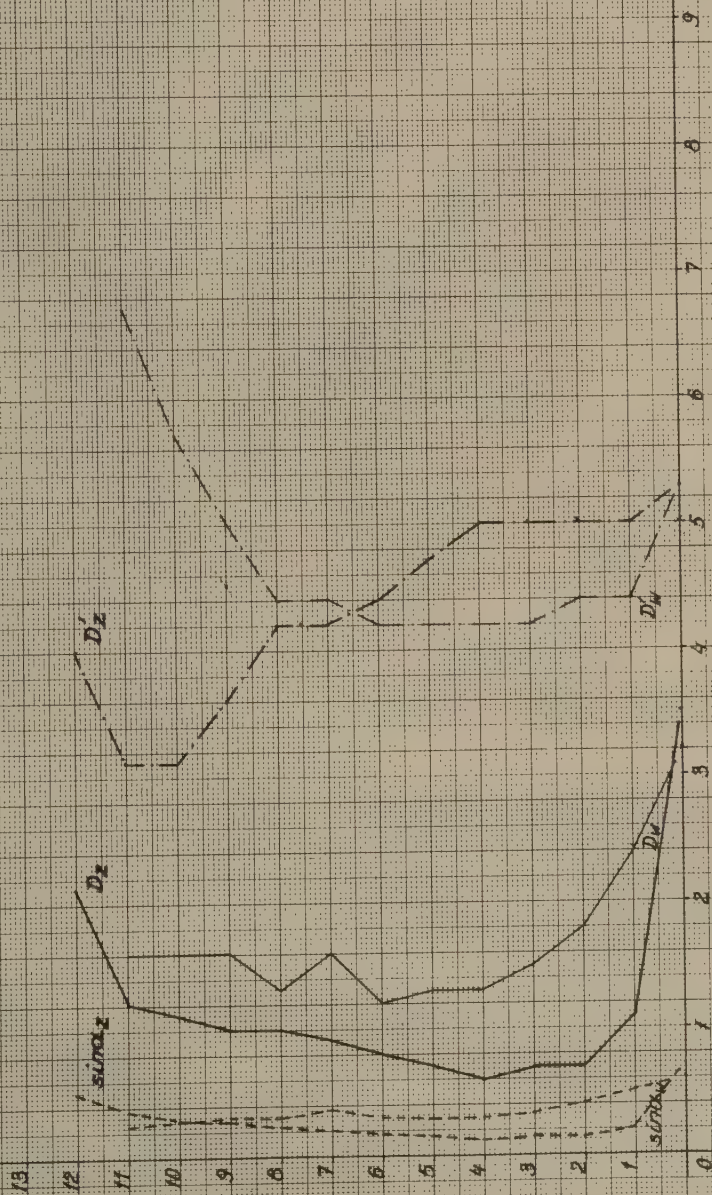


Abb 41

1 Handschwinge — Innenfahne (Ziegenmelker — Watakauz)

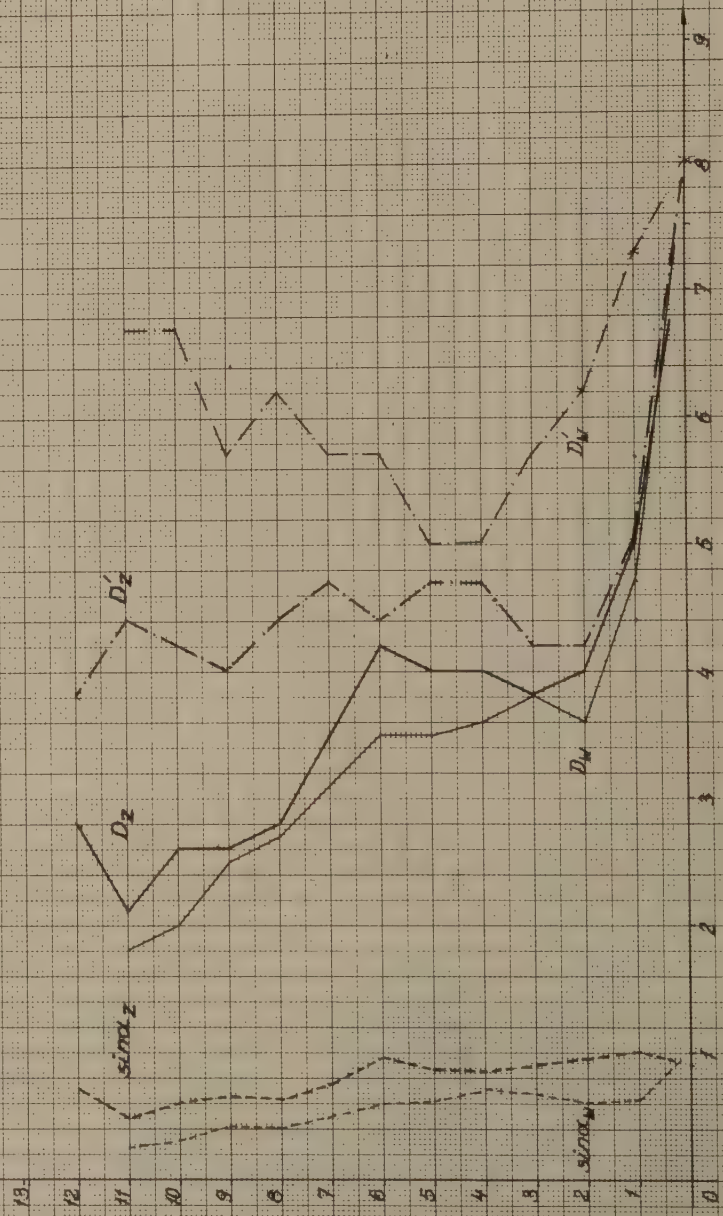
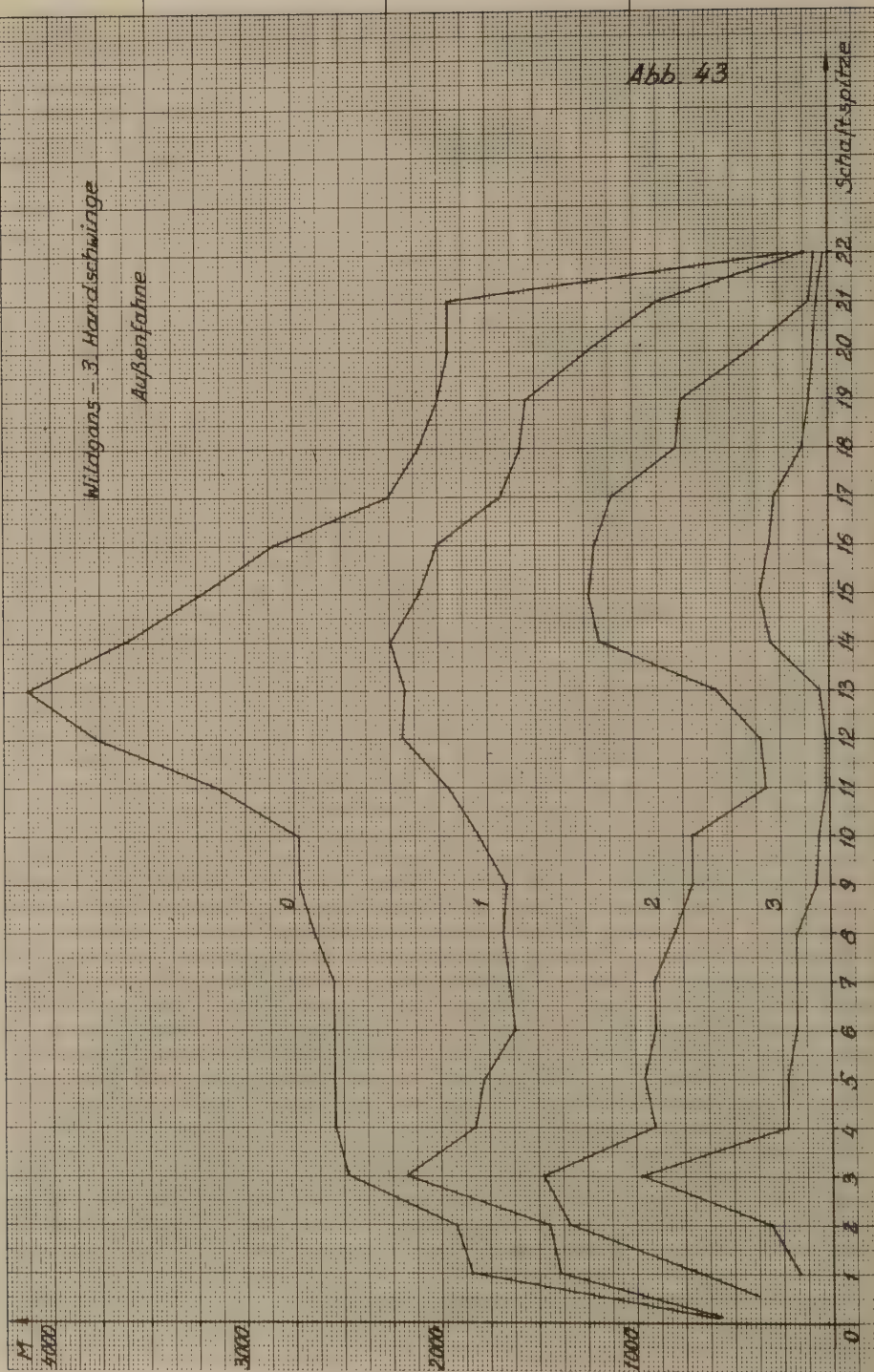


Abb 43

Wilgans - 3. Handschwinge

Außenfahne

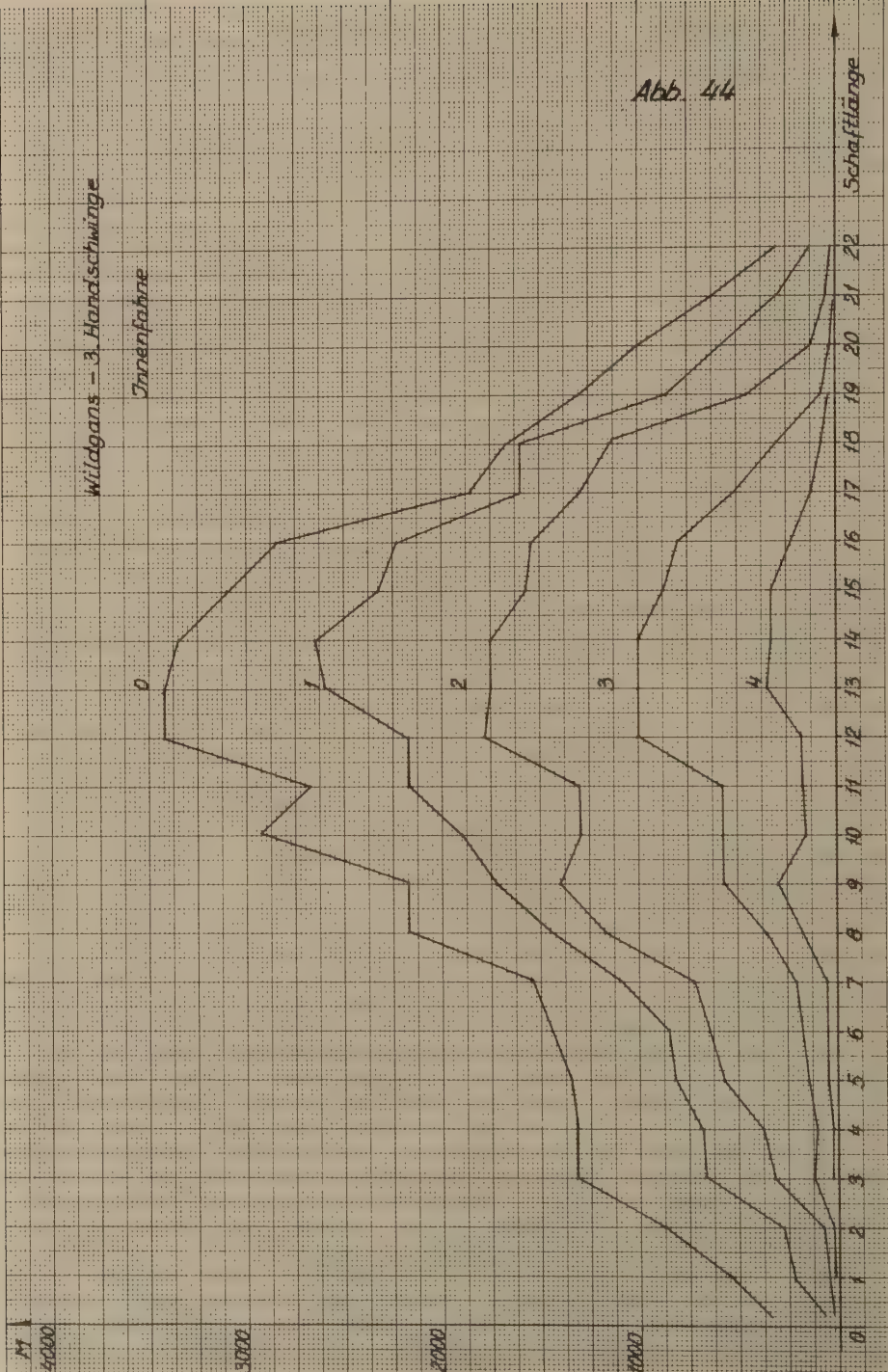


Graugans										3. HS										Außenfahne										Tab. 436																				
A-P	0										1										2										3										4									
S-P	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M	D ¹⁴	b	h	M																						
5-1	197	47	467	445	147	47	407	457	157	17	117	16																																						
0	21	5	88	1843	23	5	80	1391	25	4	64	655	197	47	287	165	137	37	27	1																														
1	26	5	100	1923	25	5	85	1445	24	5	80	1333	25	4	60	576	18	3	25	104																														
2	29	5	120	2482	27	5	108	2160	26	5	88	1489	23	5	64	975	20	5	25	156																														
3	32	5	128	2560	32	5	108	1822	32	5	76	902	28	5	36	231	22	4	25	113																														
4	32	5	128	2560	30	5	104	1802	30	5	76	962	28	5	36	231	26	4	15	34																														
5	32	5	128	2560	31	5	100	1612	30	5	72	864	29	5	32	176	26	3	10	11																														
6	32	5	128	2560	30	5	104	1666	30	5	72	864	30	5	32	170	25	4	10	16																														
7	32	5	130	2640	32	5	100	1690	31	5	70	790	29	5	32	176	19	4	8	13																														
8	32	5	132	2722	30	5	100	1666	30	5	64	682	30	5	22	80	20	3	5	3																														
9	32	5	132	2722	30	5	104	1802	29	5	64	706	28	5	20	71	22	3	4	2																														
10	31	5	140	3161	30	5	108	1944	30	5	44	322	28	5	10	17																																		
11	29	5	148	3776	28	5	108	2208	28	5	44	345	24	5	12	30																																		
12	28	5	152	4125	27	5	108	2160	27	5	56	580	25	5	16	51																																		
13	27	5	140	3629	26	5	108	2243	26	5	76	1170	22	5	28	178																																		
14	27	5	132	3226	26	5	104	2080	26	5	80	1230	23	5	40	347	20	4	16	51																														
15	28	5	126	2835	27	5	104	2002	27	5	80	1185	22	5	36	294	18	4	8	14																														
16	32	5	120	2250	30	5	100	1666	26	5	76	1110	22	5	32	232																																		
17	30	5	112	2090	29	5	96	1588	26	5	64	787	22	5	24	130																																		
18	28	5	104	1931	27	5	92	1567	24	5	60	750	20	5	20	100																																		
19	24	5	100	2083	20	5	70	1225	20	5	40	400	18	5	16	71																																		
20	22	5	92	1923	19	5	56	825	18	5	20	117	16	5	12	45																																		

Abb. 44

Wildgans - 3. Handschwinge

Innenfahne



Graugans 3. HS Innenfahne										Tab. 44b																																								
A:-P	0										1										2										3										4									
5-P	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M	D ¹	b	h	M																						
0	237	37	487	300	257	37	187	30	307	37	127	14	347	37	127	12	347	27	107	6																														
1	25	3	68	554	28	4	40	228	28	4	20	57	34	4	16	30	33	3	12	13																														
2	27	3	84	882	29	4	44	267	30	4	24	76	33	4	16	31	35	4	12	16																														
3	28	4	96	1316	30	4	68	637	31	5	44	312	32	5	28	122	35	5	16	36																														
4	32	4	96	1346	32	4	72	648	31	5	48	371	30	5	24	96	33	5	16	36																														
5	30	4	100	1333	31	4	80	825	31	5	60	580	28	5	28	140	31	5	16	41																														
6	30	4	104	1442	32	4	84	882	32	5	64	640	30	5	32	170	30	5	16	41																														
7	30	4	108	1555	31	4	92	1092	32	5	68	722	30	5	36	216	33	5	16	41																														
8	30	4	120	2184	30	4	104	1442	30	5	84	1176	32	5	48	360	31	5	32	165																														
9	30	4	128	2402	29	4	112	1730	30	5	92	1410	31	5	60	580	33	5	44	293																														
10	30	5	132	2304	33	5	112	1900	33	5	92	1282	31	5	60	580	36	5	32	142																														
11	29	5	124	2651	27	5	108	2160	27	5	84	1306	31	5	60	580	34	5	32	150																														
12	27	5	136	3425	29	5	112	2162	28	5	100	1785	32	5	80	1000	32	5	32	160																														
13	27	5	136	3425	30	5	124	2562	31	5	104	1744	33	5	80	1000	33	5	48	349																														
14	26	5	132	3350	29	5	124	2651	31	5	104	1744	33	5	80	1000	36	5	48	320																														
15	28	5	132	3111	29	5	116	2320	31	5	100	1612	36	5	80	888	37	5	48	320																														
16	27	5	124	2847	28	5	112	2240	32	5	100	1562	32	5	72	810	34	5	40	235																														
17	27	4	112	1858	27	4	104	1602	27	5	84	1306	32	5	56	490	31	5	28	126																														
18	24	4	100	1666	23	4	96	1602	28	5	80	1142	32	5	44	302	33	5	20	60																														
19	24	4	88	1290	27	4	76	855	27	4	56	464	32	4	24	72	33	4	16	31																														
20	23	4	76	1004	25	4	60	576	26	4	28	120	30	4	16	34	31	4	12	18																														
21	23	4	60	626	25	4	32	163	25	4	16	48	26	4	12	22	28	4	8	9																														

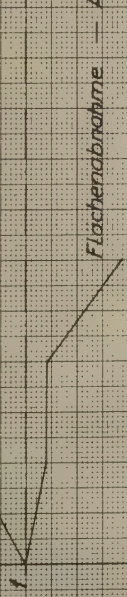
$$D_0/D_2 = 0.5$$

$$D_0/D_2 = 0.5$$



Flächenzunahme — Innenfahne

Flächendnahme — Außenfahne



Wildgans

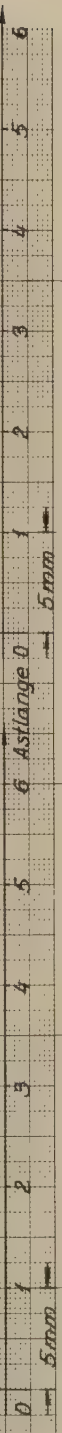
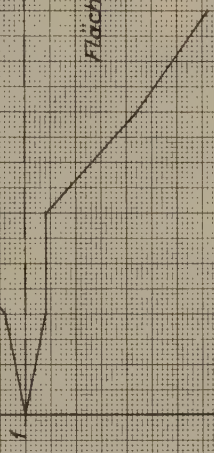
0.5 3. Handschwinge — Schaffposition 14

0.5 3. HS — Schaffposition 16

Abb. 45

Flächenzunahme — Jf

Flächendnahme — Af



M

♀ Sperber — 1. Handschwinge

1500

M

1500

Außenfahne

Innenfahne

1000

500

Schafflinge

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

1

2

3

15 mm

Abb. 46

0

1

2

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

15 mm

15 mm

M

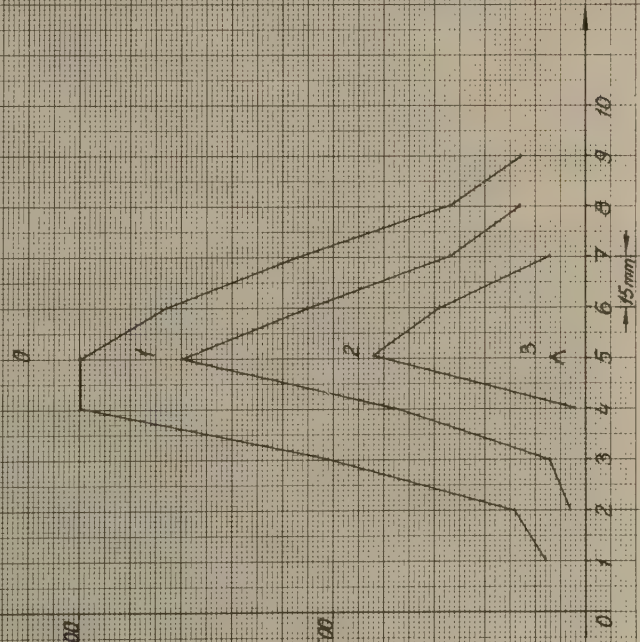
1500

1000

500

♂ Sperber - 2. Handschwinge

Außenfahne



M

1500

1000

500

Innenfahne

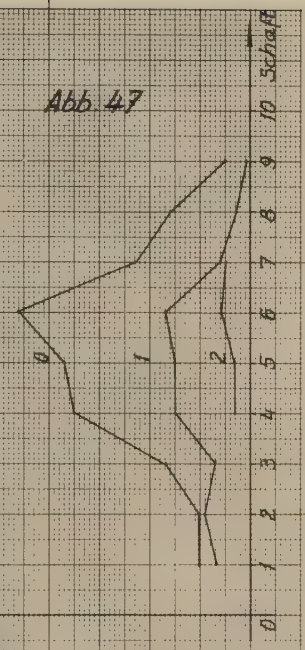


Abb. 47

10 Schläge

M

1500

M

1500

q. Speiber = 3. Handachwinge

Außenfahne

1000

0

1

2

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

15mm

Innenfahne

1000

500

Abb. 48

0

1

2

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

10 Schacht

q Spärrer — 4. Handschwinge

M

1500

1000

500

Außenfahne

0

1

2

Schaff

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

M

1500

1000

500

Innenfahne

0

1

2

Abb. 49

15mm

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

M

1500

♀ Sperber - 5. Handschwinge

1000

Außenfahne

500

0

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Schaft

15mm

M

1500

1000

Innenfahne

500

0

1

2

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Abb. 50

M

1500

p Sperber - 6. Handschwinge

Außenfahne

10000

500

M

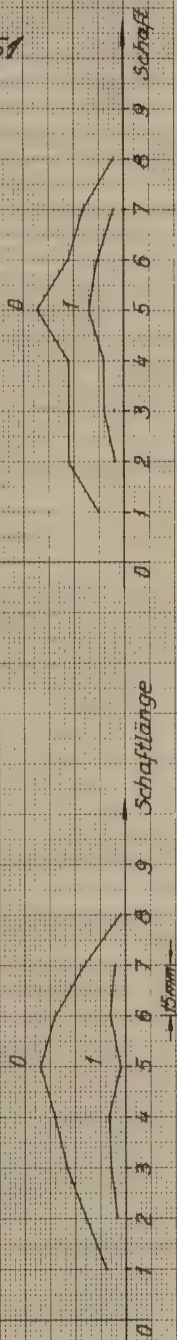
1500

Innenfahne

10000

500

Abb. 51



1500

Sperber - 7 Handschwinge

1000

Außenfahre

500

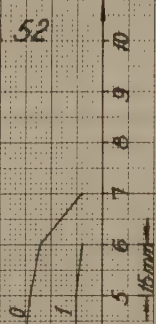
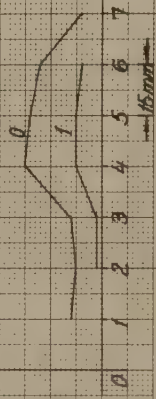
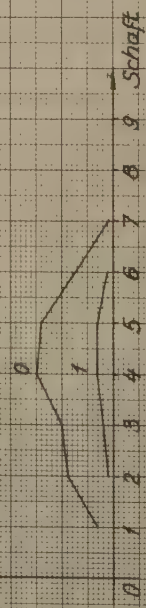
1500

1000

500

Innenfahre

Abb. 52



M
1500

g Sperber - 10. Handschwinge

Außenfahne

1000

500

Abb. 53

Innenfahne

0

15mm

M
1500

0

Schaft

1000

500

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

[illegible]

A-P

0

1

D'

D'

M

S-P

D^{1/4}

b

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

0

1

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

1

2

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

2

3

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

3

4

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

4

5

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

5

6

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

6

7

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

7

8

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

8

9

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

9

10

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

10

11

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

11

12

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

12

13

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

13

14

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

14

15

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

15

16

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

16

17

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

17

18

h

M

D^{1/4}

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

D'

b

h

M

18

19

h

Abb. 56

M

1500

q Spörber — äußerste Stoßfeder

Außenfahne

1000

500

Schäfte

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

0

1

2

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

M

1500

1000

500

Innenfahne

0

1

2

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

→ 10mm

M

1500

♂ Sperber

Außenfahre

0

1

2

1000

500

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

10mm

M

1500

1. Hand'schwinge

Innenfahre

1000

500

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

Schaft

Abb. 57

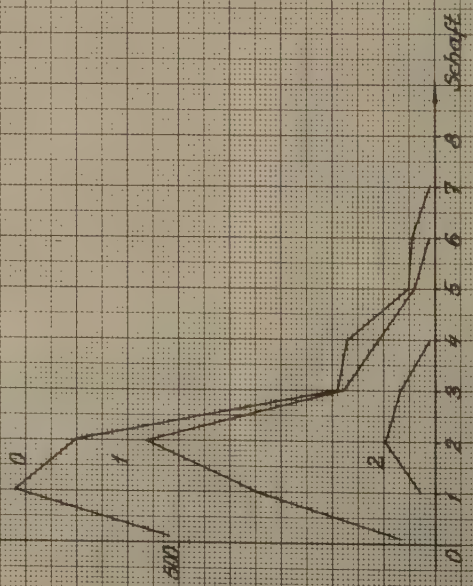
M

1500

♂ Sperber
Daumenfittich + 1 Feder
Außenfahne

1000

500



M

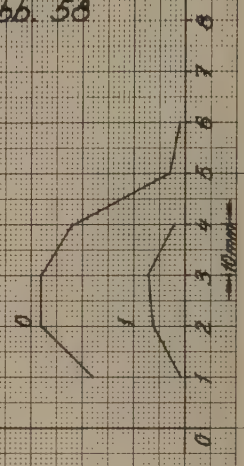
1500

Tonnenfahne

1000

500

Abb. 58



Schaft

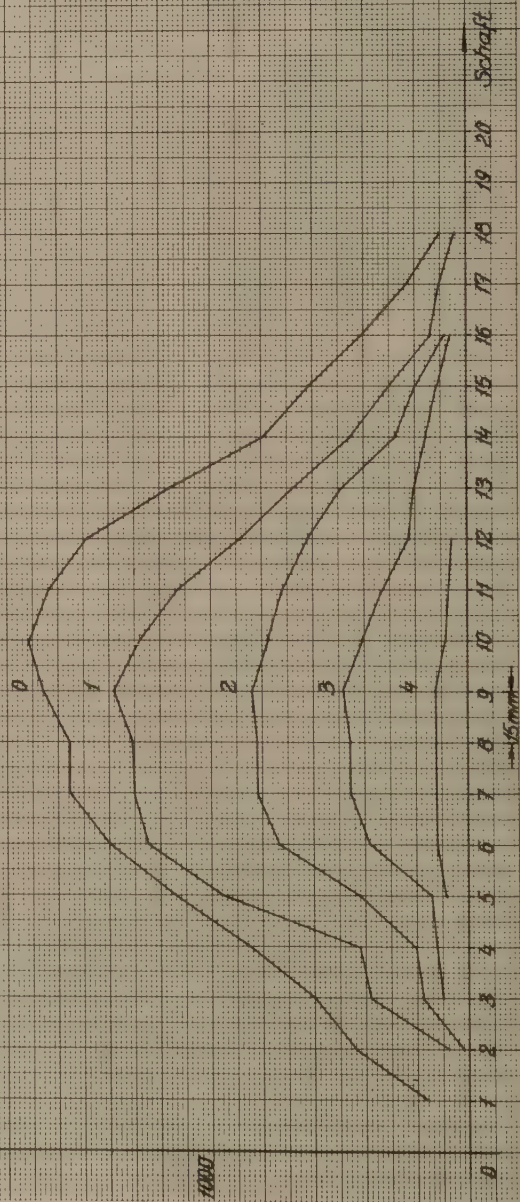
Abb. 59

Steindler - 1. Handschwinge
Außenfahne

Abb. 60

Steinmaler — 1 Handschwinge

Innenfahne



M

3000

2000

1000

Außenfahne

0

1

2

3

4

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

→ 50mm ←

M

3000

2000

1000

Innenfahne

Steinadler - 4. Hardtschwinge

0

1

2

3

4

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

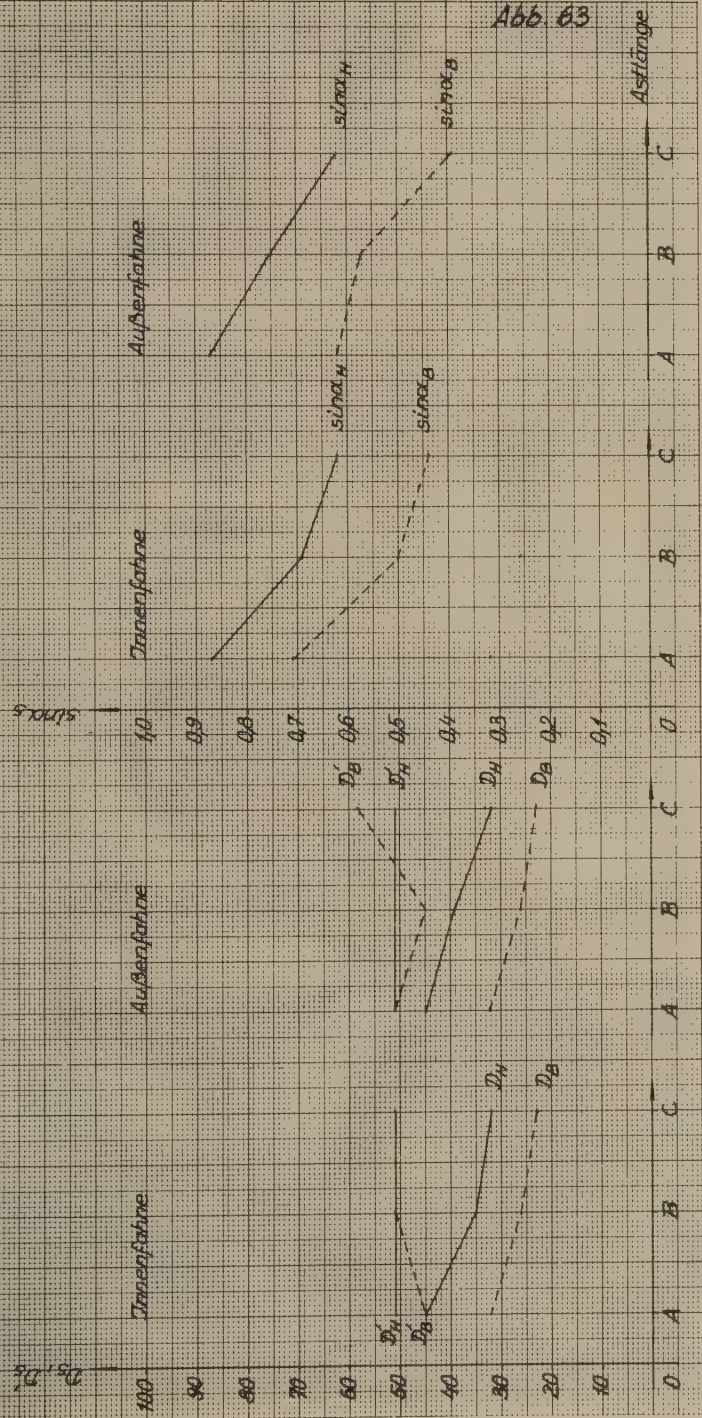
13

Abb. 61

Vogelart	Gewicht G [kg]	Flügel- F [m ²]	spezif. Flächen- belastg. G/F	Federfestigkeit M						G ² /F [kg ² /m ²]
				Federart						
				1. HS		2. HS		3. HS		
				A _F	3 _F	A _F	3 _F	A _F	3 _F	
Goldhähnchen	0,005	0,0045	1,1	13	12					0,005
Kleiber	0,024	0,012	2,0	30	20					0,05
Mauersegler	0,04	0,017	2,3	150	65					0,1
Dohle	0,23	0,046	5,0	150	160	150	140			1,1
Turnfalke	0,23	0,043	5,3	200	120					1,2
Ziegenmelker	0,08	0,054	1,5	260	150					0,16
Schleierteule	0,33	0,1	3,3	284	70					1,1
Waldohreule	0,33	0,091	3,4	360	100					1,2
Waldkauz	0,55	0,16	3,5	550	230	740	550			1,9
Sperber ♂	0,15	0,027	4,9	1100	600					0,9
Uhu	2,5	0,45	5,5	1300	750					1,4
Sperber ♀	0,3	0,06	5,0	1500	700	1000	450	850	350	1,5
Rauhfußbuss.	1,1	0,22	5,0	1930	340					5,5
Mäusebussard	1,0	0,19	5,3	2150	400					5,5
Habicht	1,1	0,17	6,4	2300	500					7,0
Steinadler	4,5	0,75	6,0	2600	1700			2800 ^{4,HS}	1600	27
Storkente	1,2	0,07	17,0	2800	1400					20
Auerhahn	5,0	0,28	14,0	3500	2400					89
Graugans	3,2	0,18	17,7	4000	3000			4200	3400	56

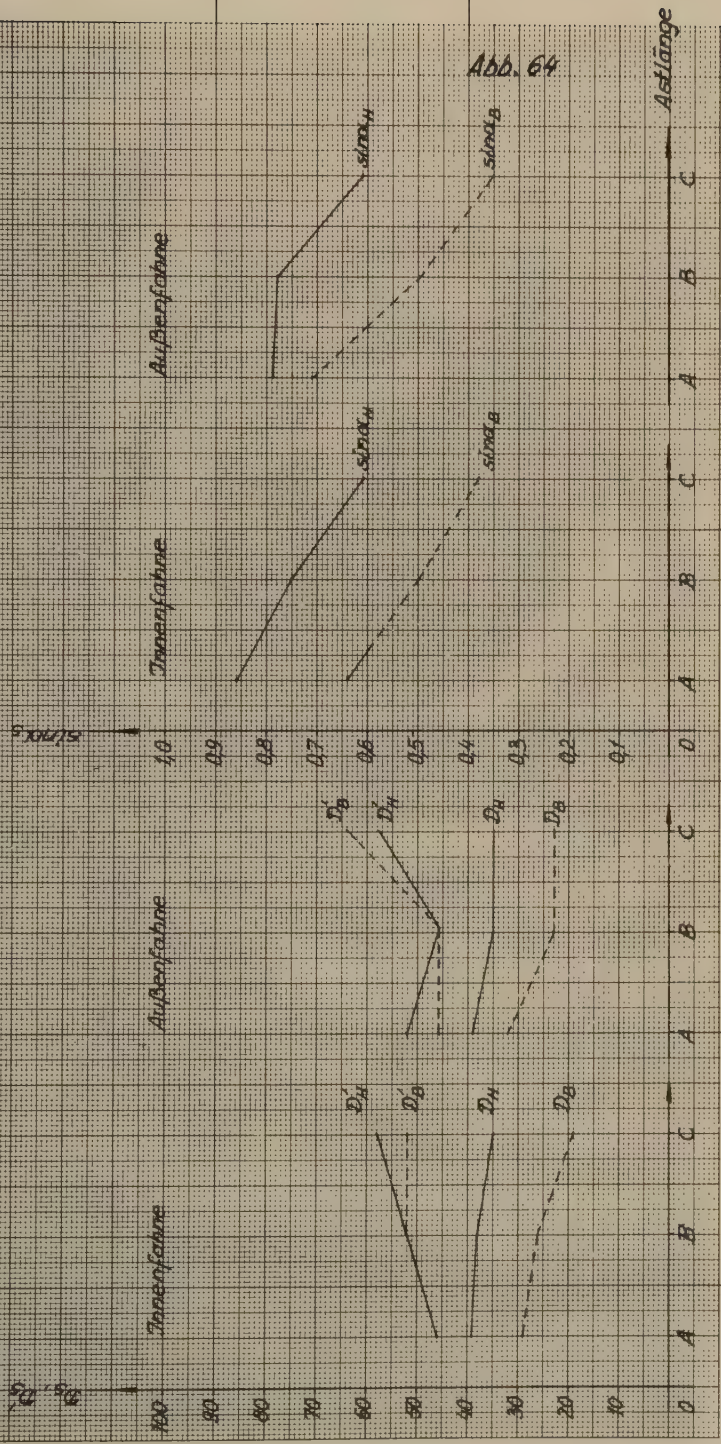
Turmfalke, 4 Handschwinge, Schafposition Nr. 6.

Vergleich Haken/Bogenstrahlen



Tierpfalke, 7 Handschwinge, Schaftposition Nr. 4

Vergleich Haken-/Bogenstrichen



Turmfalke, 10. Handschwinge, Schafteposition Nr. 3.

Vergleich Haken- Bogenstrahlen

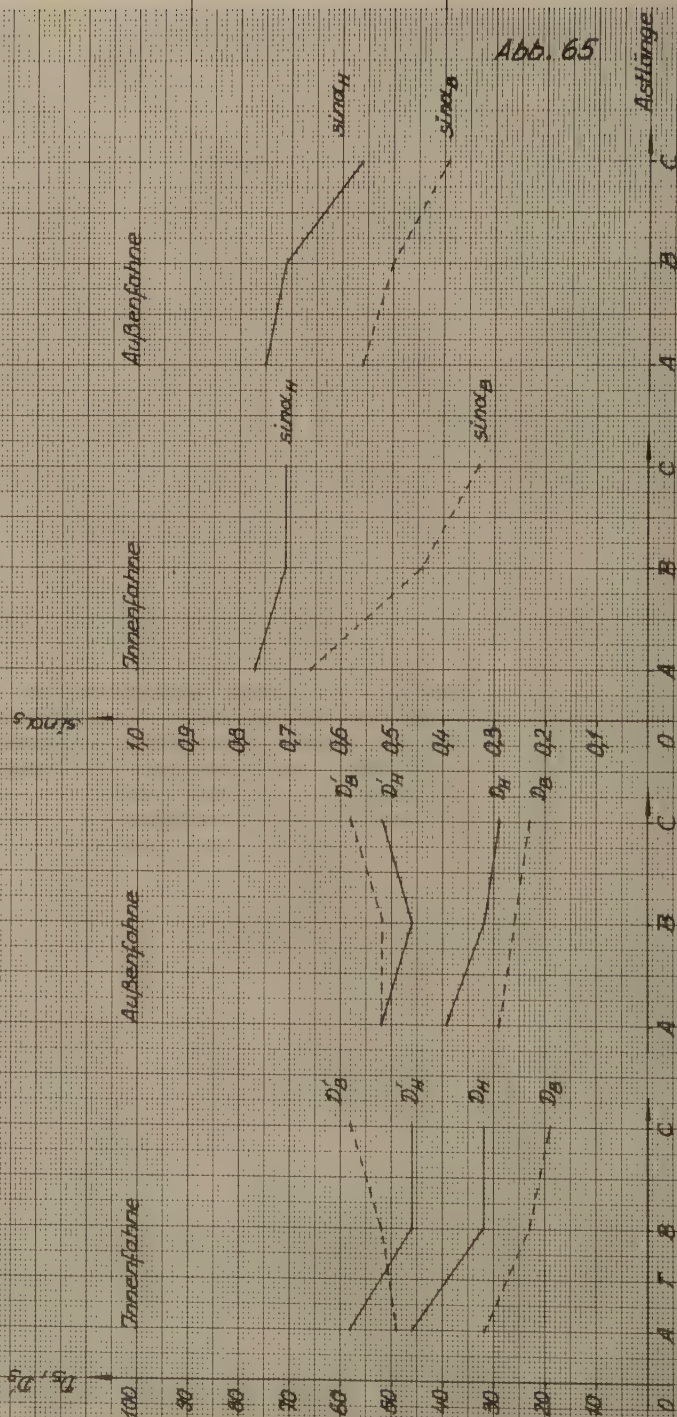


Abb. 65

Astlänge

Tab. 66b

[illegible]

L e b e n s l a u f

Ich, Bertold Alfons Schweizer, wurde geboren am 15. März 1940 in Bayreuth als Sohn des Angestellten Wilhelm Schweizer und seiner Ehefrau Martha, geb. Steiner.

Vom 6. bis zum 10. Lebensjahr besuchte ich die Volksschule in Bayreuth. Im September 1950 trat ich in das dortige Graf-Münster-Gymnasium ein. An dieser Schule legte ich im Sommer 1959 die Reifeprüfung ab.

Zum Wintersemester 1959/60 immatrikulierte ich mich als ordentlicher Student der Naturwissenschaften (Biologie-Chemie-Geographie) an der Universität Erlangen-Nürnberg.

Ab 1966 war ich Doktorand bei Herrn Professor Dr. W. Neuhaus am Zoologischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg. Die theoretische Grundlagenforschung für die Promotion war Ende 1967 abgeschlossen.

Im Juni 1968 legte ich die Wissenschaftliche Prüfung für das Höhere Lehramt an der Universität Erlangen-Nürnberg ab. Den Vorbereitungsdienst für das Höhere Lehramt leistete ich am Naturwissenschaftlichen Seminar des Graf-Münster-Gymnasiums in Bayreuth ab. Dort unterzog ich mich im Juni 1970 der Zweiten Staatsprüfung.

Seit September 1970 bin ich als Lehrer am Markgraf-Georg-Friedrich-Gymnasium in Kulmbach tätig.

